

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЭКОЛОГИИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу
окружающей среды

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Научно-производственное объединение «Тайфун»

**АЛЬМАНАХ
НАУЧНЫХ ТРУДОВ
к 60-летию НПО «ТАЙФУН»**

Сборник статей

*Под редакцией
доктора технических наук В.М. Шершакова,
доктора физико-математических наук А.Ф. Нерушева*

ОБНИНСК 2018

УДК 551.5+504.5.064

ББК 26.23+20.18

Альманах научных трудов к 60-летию НПО «Тайфун». Под редакцией д-ра техн. наук В.М. Шершакова и д-ра физ.-мат. наук А.Ф. Нерушева. М.: ООО «Информполиграф». 2018. 448 с.

ISBN 978-5-905982-09-5

В сборнике представлены статьи, кратко излагающие в исторической ретроспективе основные вехи развития работ по главным направлениям научной деятельности НПО «Тайфун»: физике облаков и активных воздействий на атмосферные процессы, физике нижней и верхней атмосферы и опасным атмосферным явлениям, мониторингу климатообразующих факторов, мониторингу радиационного и химического загрязнения окружающей среды, техническим средствам мониторинга природной среды и автоматизации научного эксперимента и наблюдений за состоянием окружающей среды.

Главное внимание уделяется ученым, заложившим в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ), затем в НПО «Тайфун» основы этих направлений, и результатам, полученным на протяжении последних нескольких десятилетий. Каждая из статей сопровождается репринтами основополагающих работ сотрудников объединения из Трудов ИЭМ разных лет, предоставляющих читателю возможность ознакомиться с творческими мыслями и идеями основоположников направлений исследований, которые успешно развиваются в объединении и в настоящее время.

Сборник представляет интерес для широкого круга специалистов, работающих в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. Особенно полезен сборник будет для молодых специалистов, аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-905982-09-5



© ФГБУ «НПО «ТАЙФУН». 2018

ПРЕДИСЛОВИЕ НАУЧНЫХ РЕДАКТОРОВ

История любого научного коллектива закладывается в момент его зарождения и формирования. От того, насколько разумны и прозорливы были отцы-основатели в своих действиях и планах, во многом зависело будущее их проекта. Чем дольше сохраняется актуальность и востребованность результатов решения научных задач, для исследования которых создавался институт и формировался коллектив ученых, тем вероятнее рост и сохранение творческого, технологического и экономического потенциала этого института на всем пути его развития и существования.

Научно-производственному объединению «Тайфун» повезло. Наши отцы-основатели обладали глубочайшими знаниями и огромным практическим опытом. Поэтому большинство научных проблем, изучением которых уже 60 лет занимается наш коллектив, обеспечили и обеспечивают нас данными и знаниями, позволяющими активно откликаться на новые вызовы и участвовать в современных научных разработках.

Судите сами. С момента своего создания в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ) НПО «Тайфун» ведутся систематические исследования изменения газового и аэрозольного состава атмосферы как факторов, существенно влияющих на метеорологические процессы и на климатическую систему Земли в целом. Развитие этих исследований базировалось на мощной экспериментальной базе, что позволило накопить богатейший материал по этой проблеме. Сегодня эти материалы нашли широкое применение при изучении экологических проблем и проблем изменения климата.

С момента создания ИЭМ одним из важных направлений его деятельности стали разработка методов и технических средств диагностики и прогноза геофизических параметров верхней атмосферы и ионосферы Земли, создание соответствующих моделей геофизических процессов применительно к проблеме прогноза погоды и долгосрочных изменений климата. Полученный опыт, созданные технические средства и уникальные результаты используются в настоящее время и успешно развиваются при проведении геофизического мониторинга.

Символ нашего города – Высотная метеорологическая мачта, введенная в эксплуатацию в октябре 1958 года и послужившая прекрасным инструментом для исследования пограничного слоя атмосферы, турбулентной диффузии в нижнем слое атмосферы, климатологических исследований – не потеряла своей актуальности как уникальное средство измерений и обрела вторую молодость. Будучи оснащенной современной измерительной аппаратурой, она широко используется при проведении оптических исследований, верификации результатов дистанционных средств измерений, а вертикальные профили метеопараметров в реальном времени свободно доступны на web-сервере НПО «Тайфун».

В число основных задач института с момента его основания входили вопросы исследования гидрометеорологических процессов в атмосфере и разработка методов активных воздействий на них. С этой целью был построен комплекс уникальных экспериментальных установок для геофизических исследований. Результаты, полученные на этих установках, нашли широкое применение в практике активных воздействий на облака. А в настоящее время методы активного воздействия успешно развиваются на базе модернизированных экспериментальных установок.

Изучение радиоактивного загрязнения окружающей среды с 1958 года было одним из главных направлений деятельности института. Необходимость контроля радиационной обстановки на территории страны возникла первоначально в связи с широкомасштабными процессами загрязнения окружающей среды в результате испытаний ядерного оружия. Результаты уникальных натурных исследований по распространению радиоактивности в окружающей среде, атмосферной турбулентности и турбулентной диффузии позволили ученым НПО «Тайфун» создать систему поддержки принятия решений по защите населения при авариях на радиационно-опасных объектах. Система позволяет прогнозировать распространение радиоактивности в атмосфере и поверхностных водах при широком круге сценариев аварийного выброса. Эта система сейчас стоит на «боевом дежурстве» на всех российских АЭС. Огромный опыт и знания о поведении радионуклидов в природе, полученные на протяжении многих лет учеными института, лежат в основе государственной системы радиационного мониторинга окружающей среды и служат надежной опорой при ее совершенствовании.

То же относится и к мониторингу химического загрязнения окружающей среды. В рамках Общегосударственной службы наблюдений и контроля за уровнем загрязнения внешней среды (ОГСНК), организованной в 70-х годах прошлого столетия, на ИЭМ были возложены обязанности головного учреждения по изучению и мониторингу химического загрязнения почв на территории СССР и уровня загрязнения атмосферного воздуха бенз(а)пиреном и тяжелыми металлами. Эти направления исследовательской деятельности не только сохранили актуальность, но и существенно расширились и стали одними из ведущих в настоящее время.

И таких примеров в данном сборнике вы найдете множество. Цель подготовки этого «Альманаха научных трудов», как нам представляется, – дать возможность читателю ознакомиться с основными вехами развития работ по главным направлениям научной деятельности НПО «Тайфун», основополагающими статьями основателей научных направлений института и оценить, в какой степени мы оправдали их надежды. В то же время в год нашего 60-летия напомнить молодому поколению научных сотрудников, инженеров и конструкторов НПО «Тайфун» об их миссии в стенах этой уважаемой организации.

Хочется надеяться, что предлагаемый «Альманах...» будет полезен ученым и специалистам, работающим в разных областях физики атмосферы и охраны природной среды и не оставит равнодушными заинтересованных читателей.



ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ФИЗИКИ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

А.С. Дрофа, В.Н. Иванов, П.Н. Свиркунов

Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ) начинал свое существование как подразделение Института прикладной геофизики (ИПГ). В число основных задач института входили вопросы исследования гидрометеорологических процессов в атмосфере и разработка методов активных воздействий на них. Уже в 1963 году в филиале работали научная лаборатория активных воздействий на метеорологические процессы (заведующий – Л.С. Саркисян) и отдел механики аэрозолей (заведующий – Л.М. Левин), в задачи которого входили исследования по физике облаков. Позднее

лабораторию активных воздействий возглавил И.В. Литвинов. В последующие времена руководителями отделов ИЭМ, в которых проводились исследования по физике облаков и активным воздействиям, были О.А. Волковицкий, В.М. Волощук, А.С. Степанов, В.В. Смирнов, В.Н. Иванов. В этих подразделениях широким фронтом развернулись исследования по фундаментальным проблемам физики облаков и физическому обоснованию эффективных методов воздействий и разработке необходимых для их осуществления средств и реагентов. Теория и эксперимент, как говорится, шли рука об руку. Основные этапы развития работ в ИЭМ по данным направлениям излагаются в настоящей статье.

Первые экспериментальные работы в ИЭМ по активным воздействиям

Примером одного из первых в СССР крупномасштабных экспериментов по воздействию на облака являются проведенные зимой 1965/66 г. опытные работы по уменьшению зимних осадков над Москвой [1]. Предполагалось, что путем воздействия на приближающиеся к Москве облачные системы можно вызвать осадки из них, тем самым уменьшив их водозапас и интенсивность осадков над заданной территорией.

Для решения этой задачи под Москвой был организован метеорологический полигон на территории радиусом 100 км с центром в г. Обнинске, состоящий из наземной сети для измерения осадков и аппаратуры для управления полетами самолетов, участвующих в эксперименте (И.В. Литвинов, Э.Л. Александров и другие). Воздействие на облака осуществлялось твердой углекислотой, рассеиваемой перпендикулярно направлению переноса облачных масс с самолетов ИЛ-14 и АН-12. Одновременно на расстоянии 30–70 км на наветренной стороне еще одним самолетом производилось зондирование атмосферы. Измерялись температура, влажность, водность, микроструктура облаков. Наблюдения за осадками осуществлялись с помощью радиолокаторов.

Анализ результатов проведенных экспериментов показал, что с достоверностью 97,5 % за зоной с увеличенным количеством осадков наблюдается зона с уменьшенными осадками. На основе данных экспериментов и проведенных расчетов была показана принципиальная возможность уменьшения зимних осадков над заданной территорией. Этот метод воздействия получил

дальнейшее развитие и используется в настоящее время в работах по улучшению погодных условий во время массовых мероприятий в г. Москве.

С 1959 по 1964 г. был проведен цикл работ по рассеянию переохлажденной облачности [1,7]. Начальниками летных экспедиций, проводивших натурные эксперименты, были Э.Л. Александров, В.В. Вяльцев, И.В. Литвинов, Ю.С. Седунов. При проведении работ решались задачи по разработке соответствующей методики воздействия и изучению влияния рассеяния облачности на погодные условия.

Для воздействия использовалась твердая углекислота, под действием которой в переохлажденном облаке начинался рост и выпадение образовавшихся кристаллов. Для доставки реагента использовались самолеты. Площадь зоны рассеяния облаков определяется скоростью двух процессов: рассеяния облачности и затягивание рассеянной зоны вследствие турбулентности. Проведенные исследования показали, что с помощью одного самолета ИЛ-14 можно рассеять облачность на площади до 1000 км², с использованием двух самолетов рассеянная площадь увеличивается до 3000 км², а трех – до 10 000 км². Большое внимание при проведении исследований уделялось отработке методики воздействия, которая должна учитывать погодные условия и структуру облачности и определять траекторию полета, высоту, время и характер воздействия.

Возможности использования такого способа воздействия были наглядно продемонстрированы в Крыму 15 февраля 1961 года во время солнечного затмения. В Крымскую обсерваторию для наблюдения солнечного затмения съехались многие астрономы СССР и зарубежных стран. Прогнозы были неблагоприятны для наблюдений, в связи с чем, по просьбе Астрономического совета СССР, были проведены работы по раскрытию облачности над Крымской обсерваторией. Результаты проведенных работ по воздействию оказались успешными. В течение всего периода наблюдений солнечного затмения небо над Крымской обсерваторией было свободным от облаков.

При проведении работ по воздействию значительное внимание уделялось эффекту влияния рассеяния облачности на погодные условия. Известно, что метеорологические параметры нижнего слоя атмосферы в большой степени определяются радиационным балансом, который, в свою очередь, зависит от

облачности. Расчеты показывают, что рассеяние облачности в дневное время должно приводить к прогреву приземного слоя воздуха, в ночное – к радиационному выхолаживанию. Проведенные в 1961 году натурные эксперименты подтвердили эти выводы. Эксперимент по рассеянию тумана мощностью около 400 м на площади 20x20 км² проводился в окрестностях г. Нальчика. Наблюдения показали, что в области рассеяния тумана приземная температура за 6 часов повысилась на 7,6 °С. Оценки показали, что рассеяние тумана привело к поступлению в нижний слой атмосферы около 1014 Дж тепла [1].

Комплекс экспериментальных установок ИЭМ

Отдельные успешные эксперименты по воздействию на облака и туманы потребовали подробного выяснения физических механизмов различных способов воздействия для повышения их эффективности и определения оптимальных условий проведения работ по воздействию. С этой целью в начале 60-х годов в Обнинском подразделении ИПГ по инициативе академика Е.К. Фёдорова был заложен комплекс экспериментальных установок для геофизических исследований, который был введен в эксплуатацию в 1964 году. Технологический надзор за строительством и монтажом установок аэрозольного корпуса осуществлял заведующий лабораторией экспериментальных установок О.А. Волковицкий. Он же руководил работами по оснащению установок контрольно-измерительными приборами, по их отладке и вводу в эксплуатацию всего комплекса в целом. Комплекс экспериментальных установок является уникальным и не имеет аналогов в мире. В специально спроектированном здании, названном аэрозольным корпусом, размещены большая аэрозольная камера (БАК), термобарокамеры, камера для проведения оптических исследований, горизонтальная и вертикальная аэродинамические трубы [11].

Наибольшая в мире БАК предназначена для моделирования облаков и туманов с различными характеристиками. Объем камеры составляет 3200 м³. Для создания искусственного тумана (облачной среды) к камере подведены магистрали пара, воды и сжатого воздуха. Облачная среда может образовываться подачей пара, распылением воды либо адиабатическим охлаждением воздуха в камере. Камера оснащена приборами для измерений

термодинамических параметров воздушной среды, а также оптических и микроструктурных характеристик аэрозоля и облачных частиц. В БАК проводятся экспериментальные исследования процессов образования и эволюции облачной среды, исследование методов активного воздействия на облака и туманы, а также эксперименты в области оптики атмосферы, грозового электричества и др.

Термобарокамеры представляют две цилиндрических камеры объемом около 100 м^3 (высота – 15 м, диаметр – 3 м), соединенные через камеру циркуляции трубопроводом. Термобарокамеры предназначены для моделирования процессов образования и эволюции переохлажденных жидкокапельных и кристаллических облаков и туманов при температурах от $0 \text{ }^\circ\text{C}$ до минус $55 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении – от 0,05 до 2 атм.

Камера для оптических исследований представляет железобетонный туннель длиной 50 м, сечением $4 \times 4 \text{ м}^2$. В камере можно создавать туман путем подачи пара или распылением воды. Для проведения работ по атмосферной оптике в более широком интервале давления и температуры воздуха вдоль стен размещена установка из двух труб длиной 50 м и диаметром 0,7 м. Внутрь труб можно подавать частицы твердого или жидкого аэрозоля. Давление в трубах может меняться от 10^{-3} мм рт. ст. до 5 атм.

Горизонтальная аэродинамическая труба с двухфазным потоком (скорость потока – до 100 м/с, водность – до 5 г/м^3), позволяющая исследовать взаимодействие двухфазного потока с различными объектами и реагентами. В аэродинамической трубе проводятся испытания измерителей скорости и направления ветра, а также исследования эффективности технических средств и реагентов, применяемых для воздействия на облачные среды.

Вертикальная двухфазная аэродинамическая труба с высотой рабочей части 20 м и диаметром 2 м (скорость восходящего потока – до 3 м/с, водность – до 5 г/м^3) предназначена для



Аэрозольный корпус, в котором располагается комплекс уникальных экспериментальных установок ИЭМ



*Сотрудники отдела активных воздействий ИЭМ, 1974 г.
Заведующий отделом В.В. Смирнов – в первом ряду второй слева;
нынешний директор ИЭМ В.Н. Иванов – крайний слева во втором ряду*

моделирования и исследования коагуляционных процессов в облаках, в том числе грозовых, и методов активного воздействия на них.

За время функционирования комплекса на его уникальных установках были проведены многочисленные экспериментальные исследования по широкому спектру направлений в области физики и химии облаков и туманов, атмосферной оптики, атмосферного электричества. На установках комплекса исследованы новые методы активных воздействий на теплые и переохлажденные облака и туманы, испытаны новые перспективные средства и реагенты для воздействия, проведены испытания разрабатываемой в ИЭМ измерительной аппаратуры в различных метеоусловиях и пр.

В последнее десятилетие под руководством В.Н. Иванова были выполнены работы по существенной модернизации комплекса экспериментальных установок. Полностью обновлена система энергообеспечения установок, установлена современная измерительная аппаратура. В 2013 году на базе камеры циркуляции, соединяющей две термобарокамеры, был создан низкотемпературный аэродинамический стенд для проведения исследований процессов образования и эволюции гололедно-изморозевых отложений на поверхности земли и различных конструкций и изделий (Д.Г. Сахибгареев, В.Н. Панов, Ю.В. Андреев и др.). Разработана и введена в эксплуатацию компьютерная

система автоматического управления процессами формирования модельных облачных и аэрозольных сред с заданными термодинамическими и микрофизическими характеристиками. В целом выполненные работы обеспечивают проведение на высоком современном уровне экспериментальных исследований способов, реагентов и технических средств воздействия на модельные облачные среды.

Исследования по физике облаков

Первые эксперименты с использованием БАК были проведены О.А. Волковицким, А.Г. Лактионовым, Э.Л. Александровым и др. [12]. Были исследованы вопросы начальной стадии облакообразования и формирования облачных спектров капель по размерам, вопросы влияния влажности на оптические характеристики среды и ряд других. Эти данные послужили хорошим материалом для сравнения с результатами теоретических исследований, одновременно проводившихся в ИЭМ по данной тематике.

Для развития теории облакообразования необходимо было создать адекватную модель ядер конденсации, которая опиралась бы на экспериментальные данные и была удобна для использования в теоретическом анализе. Такая модель была создана в работах Л.М. Левина и Ю.С. Седунова [24]. С ее использованием были определены характерные времена образования капель, величины максимального пересыщения, достигаемые в процессе облакообразования, концентрации и спектра по размерам образующихся капель. В дальнейшем модель дополнялась с учетом результатов работы Э.Л. Александрова [2]. Для детальных расчетов эволюции облачного спектра была тщательно изучена динамика конденсационного роста отдельной капли [3] на основе уточненного соотношения для зависимости давления насыщенных паров от концентрации растворенной соли в капле, полученной в работе Э.Л. Александрова [4]. Для уточнения динамики облакообразования детально анализировались процессы относительного движения облачных капель и их слияния, была учтена роль турбулентности, дан расчет сил взаимодействия, на основании которого были получены коэффициенты захвата с учетом совместного действия гидродинамических, электрических сил и турбулентного перемешивания (Л.М. Левин, Ю.С. Седунов).



Сотрудники отдела физики облаков ИЭМ на первомайской демонстрации, 1986 год. Слева направо: В.М. Меркулович, Е.К. Гаргер, А.С. Степанов, Н.В. Клепикова, В.М. Волощук, П.Н. Свирунов, В.Н. Арефьев, В.А. Борзилов

Большой цикл исследований по гидродинамике аэрозолей провел В.М. Волощук. Им были разработаны подходы к решению уравнений движения аэрозольных частиц в неоднородных потоках, теория аспирации и осаждения частиц, а также оценка инерционного осаждения частиц на тела различной формы; они также необходимы для расчета коэффициентов захвата гидродинамически взаимодействующих частиц, необходимых для описания процессов коагуляции в аэрозольных (в том числе облачных) средах. Основные результаты по гидродинамике грубодисперсных аэрозолей представлены в совместной с Ю.С. Седуновым монографии [15]. В дальнейшем исследовались вопросы влияния спектра ядер конденсации на процессы облакообразования, закономерности начальной стадии образования капель (Э.Л. Александров, Н.В. Клепикова, Ю.С. Седунов), моделирование процессов коагуляции (К.И. Васильева, Ю.С. Седунов).

В работах Ю.С. Седунова были установлены связи между пульсациями пересыщения, вертикальной скорости и температуры в облаках, на основе которых были заложены основы теории стохастической конденсации, которая объясняет основные особенности динамики облачного спектра. При дальнейшем развитии теории было построено кинетическое уравнение, описывающее

стохастическую конденсацию (Л.М. Левин, Ю.С. Седунов [25]), расширена область его применения на случай пространственной неоднородности и учета коагуляционных эффектов. Эти результаты исследований были подытожены в монографии Ю.С. Седунова [28]. Отметим исследования А.С. Степанова, в которых были проведены обоснования кинетических уравнений для конденсационного и коагуляционного роста облачных капель на основе аппарата неравновесной статистической механики, и работы, посвященные исследованиям электрической зарядки облачных капель (В.А. Борзилов, А.В. Савченко), а также исследованию кинетических уравнений ионной зарядки облачных частиц (В.А. Борзилов, Ю.С. Седунов, А.С. Степанов). Следует также отметить вклад А.С. Кабанова, Д.И. Бусыгиной и В.М. Меркуловича в исследования физики облаков, в частности в исследование влияния колебаний температуры и пространственной неоднородности на динамику облачных процессов.

Исследования методов воздействия на туманы

В натурных экспериментах в 1961 году был обнаружен эффект рассеяния кучевого облака при введении в его вершину порошкообразных веществ типа песка, цемента и пр. [22]. Дальнейшие исследования показали, что эффект воздействия не зависит от свойств смачиваемости порошка, а носит чисто динамический характер. Диспергированное вещество при своем падении вовлекает окружающий воздух, создавая нисходящую струю, которая вследствие развития неустойчивости атмосферы увеличивается в размерах, стимулируя диссипацию облака. Теория такого вида активного воздействия на облака, названного динамическим, была развита в работе Н.И. Вульфсона и Л.М. Левина [16]. В дальнейших исследованиях выяснилось, что нисходящие струи, разрушающие кучевое облако, могут создаваться самолетами, летящими с большими углами атаки, вертолетами, а воздействию могут быть подвержены не только облака, но и туманы. В дальнейшем теоретические исследования динамического метода воздействия на туманы были проведены К.И. Васильевой [10]. Ею была разработана численная модель воздействия струей от несущего винта вертолета для создания просветленных областей в теплых туманах. С использованием этой модели была определена оптимальная высота зависания вертолета

и размеры области, свободной от тумана, в зависимости от массы вертолета и параметров тумана – его мощности, профиля водности, температуры.

В ИЭМ разрабатывались также методы рассеяния туманов с помощью тепловых источников. Так, в работах И.М. Захаровой, Л.Д. Новиковой [21] была разработана численная модель теплового воздействия на туманы, с использованием которой были исследованы возмущения динамических и термических полей и поля водности и определено оптимальное расположение тепловых источников. Была исследована возможность использования аэродромной тепловой установки, создающей высокоскоростную струю горячего воздуха, для обеспечения условий взлета самолетов в условиях тумана. По результатам численного моделирования были определены оптимальная геометрия создаваемой зоны просвета и необходимое количество установок.

Исследование воздействия гигроскопическими аэрозолями на облака

Одним из основных направлений экспериментальных работ в БАК является исследование различных способов воздействия на облака и туманы с целью их рассеяния или регулирования осадков. Одним из таких способов, интенсивно разрабатываемых в НПО «Тайфун», является воздействие гигроскопическими частицами. На протяжении многих лет в БАК проведены испытания целого ряда различных гигроскопических реагентов, разрабатываемых для воздействия на облака и туманы (Э.Л. Александров, В.В. Смирнов, Н.П. Романов, В.Н. Иванов, А.С. Дрофа и др.).

Способ воздействия на облачную среду путем введения в нее на начальной стадии ее формирования дополнительных ядер конденсации, конкурирующих с естественными (фоновыми) ядрами, предложен Ю.С. Седуновым [29]. (Репринт работы приведен на с. 176–182.)

В зависимости от спектра размеров вводимых частиц и их концентрации можно влиять на дальнейший процесс эволюции облачной среды и последующего осадкообразования. Теоретические исследования процесса формирования облачного спектра при введении гигроскопических частиц предложенным способом проведены Э.Л. Александровым и Н.В. Клепиковой [5]. (Репринт работы приведен на с. 183–195.) В работе показано,

что введением искусственных ядер конденсации можно как увеличить, так и уменьшить концентрацию капель в развивающемся облаке и, соответственно, уменьшить или увеличить размеры облачных капель. В последнем случае воздействие может приводить к ускоренному инициированию и стимулированию в облаке коагуляционных процессов и последующего осадкообразования. В работе А.С. Дрофы [18] показано, что введение в формирующееся облако дополнительных частиц с размерами, превышающими некий характерный размер (зависящий от свойств фонового атмосферного аэрозоля и атмосферных условий), приводит к уменьшению концентрации облачных капель и к увеличению их размеров. Этот результат воздействия является положительным эффектом для получения дополнительных осадков из конвективных облаков. Выявлены условия получения максимального положительного эффекта воздействия.

Используя результаты теоретических исследований и численного моделирования, в НПО «Тайфун» по специальной технологии разработан гигроскопический реагент в виде полидисперсного солевого порошка [9,19]. Отличительной особенностью реагента является оптимальная микроструктура гигроскопических частиц для трансформации спектра облачных капель с целью интенсификации процессов коагуляции и последующего осадкообразования в конвективных облаках. Результаты экспериментального исследования в БАК эффективности воздействия солевыми порошками представлены в [19,30].

По результатам численного моделирования с использованием одномерной и трехмерной моделей конвективного облака получены данные об интенсивности осадков и общего их количества при различных режимах ввода солевого порошка в облако. Результаты численного моделирования показали значительные преимущества разработанного реагента по сравнению с другими известными гигроскопическими реагентами по эффекту воздействия и расходу реагента. На основе теоретических и экспериментальных результатов исследования эффективности разработанного реагента в НПО «Тайфун» разработана методика проведения воздействия на конвективное облако и предложена технология проведения работ по воздействию на конвективные облака с целью получения дополнительных осадков. Разработаны средства воздействия для ввода порошка в облако с использованием ракет и самолетов. Натурные испытания предложенного

метода воздействия в реальных атмосферных условиях [20] показали положительный результат и подтверждают реальную возможность получения дополнительных осадков из теплых конвективных облаков с использованием солевого порошка.

Исследование воздействия льдообразующими реагентами на переохлажденные облака и туманы

Другой важный способ активных воздействий, применяемый для переохлажденных облаков и туманов, использует распыление в облачной среде мелкодисперсных льдообразующих аэрозолей, которые образуются при горении и возгонке специальных реагентов, имеющих в своем составе йодистое серебро. Практические методы таких воздействий были разработаны в основном учеными ЦАО. Разработаны были также технические средства воздействия (противоградовые ракеты, наземные генераторы и пр.). Однако отсутствовала достаточно надежная методика оценки эффективности реагентов, определяемая количеством активных частиц на единицу массы реагента, которая зависит от многих трудно учитываемых факторов. В связи с этим в ИЭМ выполнялись работы по разработке методики испытаний на льдообразующую эффективность полноразмерных пиротехнических генераторов. В качестве базовой экспериментальной установки для испытаний было принято решение использовать горизонтальную аэродинамическую трубу комплекса экспериментальных установок ИЭМ. Разработка методики была поручена Н.С. Киму – руководителю группы льдообразующих аэрозолей. Экспериментальные исследования в аэродинамической трубе позволили определить зависимость льдообразующей эффективности от внешних условий и типов реагентов и получить основные безразмерные параметры, от которых зависит выход льдообразующих частиц [26]. В проводимых исследованиях уделялось внимание развитию теории механизма действия льдообразующих ядер (Н.С. Ким, А.В. Шкодкин [27]). Была разработана теория стохастической гетерогенной нуклеации, которая позволила определить основные параметры, определяющие этот процесс; в частности было установлено, что преимущественную роль в образовании ледяных зародышей играют поверхностные свойства льдообразующих частиц, а не их размер, как это было принято считать раньше.

На основе проведенных исследований была разработана базовая стендовая методика испытаний полноразмерных генераторов [8]. (Репринт работы приведен на с. 196–207.)

Совместно с учеными ЦАО, НИИПХ, ВГИ в ИЭМ был исследован вопрос об оптимизации содержания дорогостоящего серебра в реагентах без уменьшения их эффективности. В результате был разработан и внедрен в практику состав с 2 % содержанием йодида серебра. Эта работа в 1981 году была отмечена премией Совета Министров СССР, а Н.С. Ким был награжден правительственной наградой – медалью «За трудовое отличие».

В последние годы в ИЭМ были разработаны и запатентованы новые составы льдообразующих реагентов, отличающиеся повышенной эффективностью и высокой стабильностью свойств при длительном, до 10 лет, хранении (предельный срок хранения штатных российских составов реагентов 3 года).

Льдообразующие реагенты также были применены в ИЭМ для воздействия на туманы испарения, которые характерны для северных морей, и представляют опасность для судоходства, особенно в акваториях крупных портов. Первые работы в ИЭМ по моделированию туманов испарения и методов их рассеяния были проведены в конце 80-х годов (В.Н. Иванов, Н.К. Диденко [17]). Стенд для моделирования морских туманов испарения был организован на базе термобарокамеры Аэрозольного корпуса. Ее параметры позволяли получать переохлажденные туманы над соленой водой с характеристиками, близкими к естественным. Такие туманы при низких температурах, вплоть до температуры минус 20 °С, являются капельными. Воздействие осуществлялось путем засева тумана льдообразующим реагентом, содержащим йодид серебра. Результаты экспериментов показали, что воздействие сказывается уже через несколько минут – в тумане растут и выпадают ледяные кристаллы, а оптическая толщина тумана существенно уменьшается. Разработанный метод воздействия на туманы испарения получил подтверждение в натурных условиях на акватории Кольского залива.

Дальнейшие исследования в этом направлении были направлены на выяснение влияния гидрометеорологических условий и антропогенных факторов в процессах образования и эволюции туманов испарения (В.Н. Иванов, И.М. Захарова, Н.К. Диденко, Ю.А. Пузов, Л.Д. Новикова). В ходе исследований была разработана физико-математическая модель туманов испарения

и определены антропогенные факторы, оказывающие основное влияние на процессы туманообразования (загрязнение поверхности воды пленками нефтепродуктов, изменение состава и микроструктуры приводного аэрозоля). В результате исследований было установлено, что наличие пленок на поверхности воды изменяет режим испарения, сдвигая порог образования туманов. Наличие гигроскопических ядер также влияет на эволюцию туманов, вызывая при определенных условиях их диссипацию.

Разработка методов предотвращения заморозков

В ИЭМ совместно с ВНИИСХМ в середине 90-х годов проводились исследования, направленные на разработку и исследование методов защиты растений от заморозков с использованием активных воздействий на термический режим на границе атмосфера-почва (В.Н. Иванов, Н.К. Диденко, Ю.А. Пузов). Разрабатывались два метода. В первом методе для защиты использовались распределенные по поверхности почвы источники тепла. В качестве источников служили диспергированные по поверхности почвы реагенты, способные взаимодействовать с водяным паром атмосферы и поверхностным слоем почвы, выделяя тепло. В результате поиска и испытаний различных веществ был найден соответствующий реагент, удовлетворяющий требованиям: вещество не должно оказывать негативное воздействие на растение и почву; должно быть доступным и недорогим; теплотворная способность, а также скорость тепловыделения должны обеспечивать перегрев, необходимый для защиты растений. В результате исследований, в том числе и в натуральных условиях, была подтверждена эффективность предлагаемого метода и разработаны предложения для его практического использования.

Другой метод борьбы с заморозками основывался на создании искусственных приземных туманов, снижающих радиационное выхолаживание почвы и уменьшающих риск заморозков. В качестве метода создания искусственных туманов было предложено использовать искусственные ядра конденсации (аэрозоль гигроскопических частиц). На основе проведенных исследований были определены условия эффективного воздействия, сформулированы предложения по созданию средств генерации искусственного тумана, разработан и испытан генератор активного аэрозоля.

Активные воздействия на облака с использованием лазеров

В 1971 г. в ИЭМ начались исследования активных воздействий на облака и туманы с использованием излучения CO_2 -лазеров. В основе эффектов воздействия лежат процессы испарения облачных частиц при их нагреве лазерным излучением достаточной мощности. В результате такого воздействия в области прохождения излучения должны образовываться просветленные области, которые можно использовать для практических целей, например, для оптической связи, передачи оптических изображений, рассеяния туманов над взлетно-посадочной полосой аэродрома и ряда других. Общее руководство исследованиями осуществлял Ю.С. Седунов. Экспериментальные исследования проводились под руководством О.А. Волковицкого в БАК, где размещался мощный CO_2 -лазер и необходимая контрольно-измерительная аппаратура. Теоретические исследования воздействия излучения на отдельные капли проводились Л.П. Семеновым и П.Н. Свиркуновым. Исследовались законы и режимы испарения и взрыва отдельных капель и ледяных кристаллов в поле излучения CO_2 -лазера. Эксперименты с отдельными каплями проводились В.Я. Коровиным. Теоретически и в лабораторных условиях исследовались эффекты образования просветленных зон в облаках и туманах, их замывание под действием ветрового переноса облачной среды, а также эффекты нелинейной рефракции оптических пучков. Значительный вклад в эти исследования внесли А.Ф. Нерушев, Е.В. Иванов, Д.Е. Светогоров, С.Д. Пинчук, Р.Х. Алмаев.

М.П. Коломеевым был обнаружен новый эффект, противоположный просветлению – «замутнение» облачной среды под действием лазерного излучения при низких температурах среды. Как показали исследования, этот неожиданный эффект был связан с переконденсацией водяного пара на гомогенно образующихся в окрестности испаряющейся капли маленьких капельках. В дальнейших исследованиях были определены условия появления эффекта. Эти и другие результаты можно найти в обзорной статье группы авторов [13] и в расширенном виде – в монографии [14], хорошо известной специалистам, которая была переведена на английский язык и издана в США.

В ходе проводимых исследований было обнаружено явление образования так называемой длинной лазерной искры, представляющей цепочку плазменных очагов оптического пробы, которые возникают при испарении и ионизации паров аэрозольных частиц, попавших в область мощного лазерного импульса. Это явление было обнаружено и исследовано в работах А.М. Скрипкина, С.В. Захарченко, Г.А. Синтюрина. Дальнейшие исследования показали, что данное явление можно использовать для задач повышения эффективности молниезащиты, поскольку традиционные пассивные методы, использующие проводящие молниеотводы, исчерпали свои возможности. Одним из перспективных активных методов молниезащиты может быть инициирование молниевое разряда с помощью создания в атмосфере протяженного лазерно-искрового разряда (длинной лазерной искры). Подобные исследования проводились в США, Японии. Основная задача, которая решается в этих исследованиях, – получение достаточно протяженных (50–150 м) плазменных каналов с помощью мощного управляемого лазерного импульса. На основе проведенных экспериментов по созданию длинной лазерной искры и теоретических оценок показана возможность перехвата лидера молнии с помощью плазменных каналов в атмосфере, создаваемых лазерными импульсами.

Исследования методов воздействия на радиационный баланс Земли с целью стабилизации климата

В свете сложности и затратности мер стабилизации климата за счет регулирования выбросов парниковых газов привлекательным является геоинженерный подход к стабилизации современного климата. Под термином «геоинженерия» понимается широкий набор методов и технологий искусственного изменения глобального климата Земли для удовлетворения потребности человечества в экономически и экологически устойчивом развитии. Один из методов геоинженерии связан с воздействием на потоки приходящей солнечной радиации путем искусственного увеличения концентрации аэрозольных частиц в нижней стратосфере, частично отражающих солнечное излучение обратно в космос. Это позволяет охлаждать тропосферу и, таким образом, противодействовать потеплению климата. Впервые идея этого метода была высказана академиком М.И. Будыко в 1974 году.

Она была основана на аналогии с процессами извержения вулканов, выбрасывающих вулканическую пыль и сернистые газы в атмосферу, после чего обычно некоторое время наблюдается понижение температуры атмосферы.

Опираясь на эти идеи, в последнее время в ИЭМ были начаты работы по моделированию воздействия на климат с помощью искусственных аэрозольных слоев (В.Н. Иванов, А.В. Савченко, Ф.В. Кашин и др). Научное руководство работами осуществлял академик Ю.А. Израэль. Их совместными усилиями был разработан метод создания искусственного аэрозольного слоя в нижней стратосфере. Экспериментальные работы проводились как в специальных облачных камерах ИЭМ, так и в полевых условиях. В камерных экспериментах проведены исследования оптических характеристик стратосферных аэрозольных слоев, моделируемых серноокислым аэрозолем с параметрами (показатель преломления, размеры частиц), близкими к природному стратосферному аэрозолю. Исследовалась также динамика искусственного аэрозоля в условиях, близких к тем, которые имеют место в реальной стратосфере (давление, температура, влажность, ультрафиолет).

Следующим этапом этих работ явилось проведение ограниченного натурного эксперимента в атмосфере по исследованию изменения теплового режима нижней атмосферы вследствие ослабления солнечной радиации искусственными аэрозольными слоями. Натурные эксперименты показали, что уменьшение потока солнечной радиации приводит к сравнительно быстрой реакции приземного слоя воздуха, проявляющейся в заметном уменьшении температуры и турбулентных потоков тепла [31]. Таким образом, экранирование поверхности земли с помощью искусственных аэрозолей является эффективным средством регулирования температурного режима нижней атмосферы. Эти исследования продолжаются и в настоящее время.

Исследования по активным воздействиям различными методами на атмосферные процессы продолжают в НПО «Тайфун» в настоящее время. Совершенствуются составы реагентов, разрабатываются методики оценки их эффективности, модернизируются средства доставки реагентов в облака и туманы. Использование модернизированного комплекса модельных установок обеспечивает решение задач физики облаков и активных воздействий на высоком современном научно-техническом уровне.

Список литературы

1. Александров Э.Л., Литвинов И.В. Активные воздействия на облака // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 7. С.11–16.
2. Александров Э.Л. О происхождении атмосферных аэрозолей // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 20. С. 72–83.
3. Александров Э.Л., Левин Л.М., Седунов Ю.С. Конденсационный рост капель раствора // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1967. Т. 3, № 8. С. 12–24.
4. Александров Э.Л. О давлении водяного пара над растворами // Труды ИПГ. 1967. Вып. 9. С. 77–82.
5. Александров Э.Л., Клепикова Н.В. Воздействие искусственными ядрами конденсации на развитие облачного спектра // Труды ИЭМ, 1975. Вып. 9(52). С. 3–15. (Репринт работы приведен на с. 183–194.)
6. Беляев С.П., Дьяченко Ю.Д., Ким Н.С. Исследования эффективности действия натуральных пиротехнических генераторов льдообразующих аэрозолей // Труды ИЭМ. 1976. Вып. 14(59). С. 21–32.
7. Беляев В.И., Вяльцев В.В., Павлова И.С. Опыт воздействия на погоду при засеивании тумана сухим льдом // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1966. Т. 2, № 6. С. 654–659.
8. Беляев С.П., Ким Н.С. Разработка методики испытания генераторов льдообразующих аэрозолей и исследования некоторых условий воздействия на выход активных ядер // Проблемы метеорологии. Л.: Гидрометеоздат, 1979. С. 189–197. (Репринт работы приведен на с. 196–207.)
9. Беляева М.В., Дрофа А.С., Иванов В.Н. Эффективность стимулирования осадков из конвективных облаков солевыми порошками // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 2. С. 171–179.
10. Васильева К.И. Моделирование воздействия на теплый туман струей от несущего винта вертолета // Труды ИЭМ. 1991. Вып. 52(147). С. 26–35.
11. Волковицкий О.А. Комплекс экспериментальных установок для геофизических исследований // Метеорология и гидрология. 1965. № 6. С. 45–61.
12. Волковицкий О.А. Лабораторные исследования физики облаков // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 7. С. 24–36.

13. Волковицкий О.А., Иванов Е.И., Нерушев А.Ф., Николаев В.П., Свиркунов П.Н., Седунов Ю.С., Семенов Л.П., Скрипкин А.М. Просветление облачной среды лазерным излучением // Проблемы метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 65–78.
14. Волковицкий О.А., Седунов Ю.С., Семенов Л.П. Распространение интенсивного лазерного излучения в облаках. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 312.
15. Волощук В.М., Седунов Ю.С. Процессы коагуляции в дисперсных системах. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 320 с.
16. Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Разрушение развивающихся облаков искусственно созданными струями // Доклады АН СССР. 1968. Т. 181, № 8. С. 87–96.
17. Диденко Н.К., Иванов В.Н. Лабораторное моделирование туманов испарения // Труды ИЭМ. 1989. Вып. 48(138). С. 34–41.
18. Дрофа А.С. Формирование микроструктуры облачной среды при введении гигроскопических частиц // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 3. С. 355–366.
19. Дрофа А. С., Ераньков В. Г., Иванов В. Н., Шилин А. Г., Яскевич Г.Ф. Экспериментальные исследования эффективности воздействия солевыми порошками на конвективное облако для увеличения осадков // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49, № 3ю. С. 327–335.
20. Дрофа А.С., Иванов В.Н., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Бычков А.А., Частухин А.В. Натурные испытания эффективности воздействия солевым порошком на облака // Труды ГГО. 2017. Вып. 585. С. 77–84.
21. Захарова И.М., Новикова Л.Д. Исследование теплового способа воздействия на туманы путем численного моделирования // Труды ИЭМ. 1991. Вып. 52(147). С. 43–58.
22. Израэль Ю.А., Захаров В.М., Иванов В.Н. и др. Натурный эксперимент по моделированию влияния аэрозольных слоев на изменчивость солнечной инсоляции и метеорологических характеристик приземного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 5–13.
23. Лебедев С.Л., Александров Э.Л. Искусственное рассеяние кучевого облака при введении в него смачиваемых частиц. Исследование облаков, осадков и грозового электричества. М.: Изд-во АН СССР, 1961. С. 73–78.
24. Левин Л.М., Седунов Ю.С. Некоторые вопросы теории ядер конденсации // Доклады АН СССР. 1966. Т. 170, № 1. С. 37–41.
25. Левин Л.М., Седунов Ю.С. Кинетическое уравнение для описания микрофизических процессов в облаках // Доклады Академии наук СССР. 1966. Т. 170, № 2. С. 323–326.
26. Ким С.Н. Исследования льдообразующей активности аэрозолей йодистого серебра в зависимости от его формирования: Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Обнинск, 1978. 20 с.

27. Ким Н.С., Шкодкин А.В. Универсальная характеристика льдообразующих ядер // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28, № 9. С. 967–972.

28. Седунов Ю.С. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 208 с.

29. Седунов Ю.С. Численный эксперимент по воздействию на кинетику формирования облачного спектра путем введения дополнительных ядер конденсации // Труды ИЭМ. 1969. Вып. 6. С. 3–9. (Репринт работы приведен на с. 176–182.)

30. Drofa A.S., Ivanov V.N., Rosenfeld D., Shilin A.G. Studying an effect of salt powder seeding used for precipitation enhancement from convective clouds // Atmos. Chem. Phys. 2010. Vol. 10, N. 16. P. 8011–8023.

31. Израэль Ю.А., Захаров В.М., Иванов В.Н. и др. Натурный эксперимент по моделированию влияния аэрозольных слоев на изменчивость солнечной инсоляции и метеорологические характеристики приземного слоя атмосферы // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 5–13.



ПОГРАНИЧНЫЙ СЛОЙ АТМОСФЕРЫ

М.А. Новицкий

Исследования турбулентной диффузии в нижнем слое атмосферы под руководством Н.Л. Бызовой начались в 1958 г. сразу после окончания строительства высотной метеорологической мачты (ВММ). Целью работ этого направления было моделирование выбросов дымовых труб предприятий и создание методики расчета рассеяния оседающих частиц в атмосфере [1]. При этом эксперименты по рассеянию сопровождались детальными измерениями метеорологических условий с помощью ВММ. По данным экспериментов были получены зависимости осевой плотности осадка от расстояний



*Н.Л. Бызова после защиты
диссертации*

до основания источника и распределение плотности осадка в поперечном ветру направлении [5, 6]. Проведено большое число опытов, относящихся к различным классам устойчивости, что значительно расширило диапазон состояний, при которых изучалась диффузия ранее. Весьма полезными для практики были результаты, связанные с влиянием различных параметров на процессы диффузии (высоты источника, стратификации атмосферы и др.).

Большое внимание Н.Л. Бызова уделяла совершенствованию описания

рассеяния примеси с помощью полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии. Ею был проведен детальный анализ влияния коэффициента диффузии на характер рассеяния примесей, вытекающий из решения полуэмпирического уравнения. Этот анализ позволил дать рекомендации по оптимальному заданию профиля коэффициента турбулентной диффузии [6]. В дальнейшем по материалам серий наблюдений, проведенных при различных метеорологических условиях, различных высотах источника, различных размерах частиц аэрозоля, были определены безразмерные эмпирические параметры диффузии, позволяющие учитывать состояние стратификации атмосферы. Интересные результаты получены для описания диффузии от точечного источника конечного времени действия [2], а также для рассеяния примесей от высотного точечного источника; создана методика расчета рассеяния оседающей примеси от высотного точечного источника [9].

Однако первые же серии опытов показали недостатки полуэмпирической теории для описания горизонтальной диффузии в поперечном ветру направлении. Решено было воспользоваться статистической теорией, которая рассматривает диффузию



Сотрудники ВММ в 1976 году

как турбулентность в переменных Лагранжа. К числу наиболее интересных исследований в этой области относятся исследования лагранжевых характеристик турбулентности при различной стратификации пограничного слоя [8]. С помощью методов дымовых струй, а также траекторий уравновешенных баллонов Н.Л. Бызовой вместе с Е.К. Гаргером были получены пространственные границы известных степенных режимов зависимости дисперсии примеси от расстояния. Уникальность полученных результатов связана с тем, что эти эксперименты сопровождались турбулентными измерениями в эйлеровых координатах, что позволило определить ряд эмпирических констант. Оценки характеристик диффузии по эйлеровым турбулентным параметрам, измеренным на ВММ, были получены В.Н. Ивановым [26]. В [31] изложены основы метода, а также приводится теоретически полученное соотношение между константами законов инерционного интервала турбулентности в эйлеровых и лагранжевых координатах и выводится вид корреляционной функции двух частиц. В дальнейшем это направление получило в ИЭМ определенное развитие [5, 6].

Измерение лагранжевых характеристик турбулентности представляет собой достаточно сложную экспериментальную задачу,



В.Н. Иванов

поэтому в любом случае необходима методика расчетов параметров диффузии по измерениям в фиксированной точке. Наиболее точными в этом случае являются методы, основанные на связях между лагранжевыми и эйлеровыми характеристиками, для применения которых необходимы измерения профилей турбулентных характеристик. В том варианте, который разрабатывался в ИЭМ, такими характеристиками являются энергия пульсаций компоненты скорости ветра в направлении диффузии и диссипация турбулентной энергии [10].

Территория, окружающая высотную мачту, не является идеально однородной, поэтому пришлось поставить работы, которые позволили убедиться, что с известной степенью точности закономерности теории приземного слоя атмосферы здесь соблюдаются. Под руководством Н.Л. Бызовой были проведены исследования мезошероховатости и ее влияние на профили температуры и скорости ветра в пограничном слое [3, 4]. Отметим также [10], где приведены оценки характеристик микро- и мезошероховатости подстилающей поверхности в зависимости от направления ветра. Показано, что их значения могут меняться на порядок при разных направлениях ветра, но существенно связаны с состоянием подстилающей поверхности (трава, снег).

Современные теоретические представления о пограничном слое атмосферы позволили использовать материалы измерений для построения безразмерных профилей скорости ветра и температуры при различной стратификации пограничного слоя. Безразмерные характеристики профилей скорости ветра, полученные по материалам более чем четырехсот измерений при различной стратификации, сравнивались с аналогичными данными, полученными в другом географическом пункте – на широте около 40° в США [10]. Там приведены сравнения различных способов классификации состояний, в том числе простейшего, основанного на результатах измерений обычных сетевых метеорологических станций. Зависимость геострофического



Суровые зимние условия на ВММ

коэффициента трения от параметра стратификации качественно подтверждается данными измерений на высотной мачте [10]. Оценки безразмерных характеристик пограничного слоя атмосферы, выбранных на основе теории подобия, проведены в [10]. Построенная Н.Л. Бызовой инженерная модель пограничного слоя атмосферы (ПСА) при нейтральной и устойчивой стратификации представлена в [19]. Будучи основана на известных ранее закономерностях ПСА, она на основе ряда эмпирических зависимостей впервые распространяется на очень устойчивые условия, связанные с перемежающейся турбулентностью.

Большой цикл работ проведен в ИЭМ В.Н. Ивановым, А.Е. Ордановичем и Л.И. Петровой для исследования особенностей структуры пограничного слоя атмосферы при неустойчивой стратификации [10]. Показано, что при неустойчивости в пограничном слое наблюдается некоторая мезомасштабная структура, которая оказывает влияние на распределение метеорологических параметров. Ее необходимо учитывать также при решении ряда прикладных задач, в частности при выборе времени осреднения для оценки потоков тепла и количества движения. Дополнительная сложность при неустойчивом состоянии атмосферы вносится обратным воздействием кучевой облачности. Показано, что размеры скоростных и температурных неоднородностей

в пограничном слое могут быть различными. В период развития конвекции они относительно мелкомасштабны и близки к тем, которые наблюдаются в нижнем слое атмосферы при безразличной стратификации (100–1000 м). С повышением неустойчивости, как правило, возникает крупномасштабная структура, размеры которой лежат в диапазоне 3–8 км. В наиболее простом случае она близка по своим свойствам к так называемым «ячейкам Бернара», которые сносятся средним ветром. Диапазон низких частот, который соответствует крупномасштабной структуре пограничного слоя, рассматривается в [10]. Предложены возможные варианты деления конвекции по степени ее развития.

Крупномасштабная структура может соответствовать двум различным ситуациям. К первой из них относится простой случай безоблачного неба. Более распространенным при неустойчивости, однако, является случай с наличием облаков. Сравнение масштабов турбулентной ячейковой конвекции с размерами кучевой облачности получено путем синхронных наблюдений на метеорологической мачте и с метеорологических спутников Земли системы «Метеор» [10]. Это позволило выявить количественные связи между ними: размеры ветровых и температурных неоднородностей в пограничном слое атмосферы при неустойчивости близки к размерам кучевых облаков. Восходящие токи и положительные пульсации температуры имеют большие амплитуды, чем отрицательные. Асимметрия в распределении вертикальных скоростей приводит к тому, что отношение площадей восходящих и нисходящих потоков неодинаково и равно примерно 0,3. Значительное влияние крупномасштабная структура оказывает на мелкомасштабную турбулентность. Наблюдается, например, модуляция величины диссипации турбулентной энергии и текущего значения турбулентной энергии мелкомасштабных компонент.

Целью высотных климатических наблюдений было выявление особенностей профилей ветра и температуры в нижнем 300-метровом слое атмосферы и связей этих особенностей с теми или иными факторами, их определяющими. Эти наблюдения продолжают по настоящее время, накоплен большой массив ежечасных данных на трех уровнях ВММ плюс данные о ежедневной погоде. Этот большой массив ежегодно дополняется (http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/daily_flow.asp). В свое время [26] получена зависимость осредненных профилей скорости ветра и температуры, а также их вертикальных градиентов от



75 лет Н.Ф. Мазурину

времени года и суток. В 300-метровом слое определены повторяемости скорости ветра разных диапазонов и направления ветра разных румбов, сделана выборка и определены средние вертикальные градиенты температуры и скорости ветра при высоте нижней границы облачности менее 300 м. Показано, что профили ветра в этих условиях могут быть различных типов, иногда довольно необычного вида. По материалам наблюдений определены характеристики профилей направления ветра, средние вертикальные и максимальные повороты в пределах 300-метрового слоя; получена связь этих поворотов со временем года, временем суток. Изучению суточного хода метеорологических параметров в пограничном слое атмосферы посвящено значительное число теоретических работ, однако разработанные модели не всегда адекватно описывают результаты измерений. Полный цикл изменений метеорологических параметров в течение типичных суток при условии минимального воздействия процессов синоптического масштаба в разные сезоны года рассматривается в [25]. В [29] предложена модель суточного хода температуры в пограничном слое атмосферы с учетом влияния потока тепла на коэффициент турбулентного обмена. Оценки соответствия между ветром на уровнях в пределах 300 м и геострофическим ветром выполнены [10]

по материалам ежедневных круглосуточных измерений в течение 6 лет (1962–1968 гг.). По этим наблюдениям анализируются соотношения между геострофическим ветром, рассчитанным по наземному полю давления, и реальным ветром, измеренным на двух уровнях (8 и 300 м). Показано, что скорость геострофического ветра имеет годовой ход с амплитудой 6 м/с. Отклонение направления реального приземного ветра от геострофического в среднем за год составляет около 34° . Обнаружена зависимость между скоростью геострофического ветра и характером стратификации атмосферы. Получена оценка зависимости геострофического коэффициента трения, который определяет соотношение между скоростью ветра в свободной атмосфере и в приземном слое, от параметра стратификации пограничного слоя атмосферы [10].

Пограничный слой при устойчивой стратификации, в отличие от конвективно-неустойчивого, оказывается существенно более сложным. Влияние устойчивости состоит в подавлении турбулентности и ее зависимости от числа Ричардсона, имеет место соответствующая деформация профиля вектора ветра с образованием струйного течения. По результатам измерений 1972–1974 гг. была проведена типизация ночного устойчивого пограничного слоя в зависимости от степени развития в нем турбулентности [20]. Целью типизации было установление качественных отличий: наличия или отсутствия турбулентности и комбинации ее с внутренними волнами, а физическими параметрами служат число Ричардсона или его интегральные аналоги. Средние и типичные характеристики приземных и приподнятых инверсий в 300-метровом слое получены в [10]. Большое значение для физики пограничного слоя атмосферы имеют исследования вертикальных градиентов актинометрических характеристик, определяющих радиационные притоки тепла. В [10] приведены результаты измерений радиационного выхолаживания во время ночных инверсий, которые сравниваются с действительным выхолаживанием. По материалам наблюдений даны метеорологические характеристики нижнего 300-метрового слоя атмосферы в условиях радиационных инверсий.

Исследование турбулентности на ВММ было начато В.Н. Ивановым в 1959 году. Он предложил также ряд идей в области турбулентной диффузии, внес большой вклад в оснащение ВММ и разработку приборов для турбулентных измерений [25]. При его непосредственном участии решалась задача



Сотрудники отдела в экспедиции под Одессой

исследования характеристик мелкомасштабной эйлеровой турбулентности и ее масштабов в пограничном слое. В [26] изучалась зависимость интенсивности дисперсии продольного компонента скорости u_i от высоты и устойчивости. При всех условиях величина u_i оказалась практически не зависящей от высоты в пределах 300-метрового слоя, что типично для достаточно большой скорости ветра или же неустойчивой стратификации. Имеет место уменьшение интенсивности пульсаций продольного компонента скорости при переходе к устойчивости. Вместо дисперсии поперечного компонента скорости обычно измеряют пульсации направления ветра, стандартные отклонения которых получены в [27] по большому числу измерений при нейтральной стратификации. Показана зависимость стандартного отклонения поперечной компоненты от скорости ветра на высоте флюгера. Считается, что распределения турбулентных пульсаций всех трех компонент скорости ветра в обычных условиях и при соблюдении стационарности близки к нормальному. Однако распределение пульсаций модуля горизонтальной составляющей вектора ветра в 300-метровом слое несколько отличается от нормального. По данным [27], асимметрия, будучи положительной вблизи земной поверхности, с высотой уменьшается, особенно резко в слое до 25 м, и где-то на уровне 25–30 м меняет знак. Отрицательная асимметрия в слое выше 50 м означает, что

вероятность усиления ветра выше некоторого заданного уровня здесь меньше вероятности ослабления. Высокочастотный диапазон спектров пульсаций компонентов скорости целиком определяется диссипацией турбулентной энергии и границами инерционного интервала – внешней и внутренней. Полученные данные о диссипации турбулентной энергии показывают, что в грубом приближении эта величина изменяется пропорционально кубу скорости ветра, а вблизи земной поверхности – обратно пропорционально высоте; она сильно зависит от стратификации атмосферы. По данным измерений средний профиль диссипации при безразличной стратификации и большой скорости ветра и профили, относящиеся к неустойчивому состоянию, по внешнему виду и абсолютным значениям почти не различаются, однако им соответствуют совершенно разные скорости ветра. Изучение полной энергии пульсаций продольной компоненты скорости показало, что она мало изменяется с высотой, однако при изменении стратификации от устойчивой до неустойчивой может увеличиваться на порядок. Экспериментальным путем найдены безразмерные зависимости низкочастотной границы инерционного интервала как функции высоты и стратификации. Оказалось, что эта граница растет с высотой, а с повышением устойчивости границы инерционного интервала сужаются. Однако даже при устойчивой стратификации наблюдаются состояния, когда низкочастотная граница достаточно велика и достигает толщины пограничного слоя. Сравнение значений внешней границы инерционного интервала с оценками этой величины при безразличной стратификации показывает, что градиент скорости не оказывает непосредственного влияния на ее величину в направлении потока. Спектры пульсаций температуры, вертикальной и продольной составляющих скорости ветра, а также изменение с высотой средних квадратов этих параметров в атмосферном пограничном слое представлены в [28]. Кроме турбулентного поля скоростей, изучены характеристики флуктуаций температуры в нижнем 300-метровом слое. Получена зависимость средних квадратов пульсаций температуры от высоты при неустойчивой стратификации [7]. Исследовались особенности когерентных структур в АПС [32]. (Репринт статьи приведен в настоящем сборнике на с. 217–219.)

Особенности метеорологических условий в нижнем слое атмосферы при прохождении фронтов и мезомасштабных

неоднородностей описаны в [10], изменения характеристик 300-метрового слоя во время неполного солнечного затмения 20 мая 1966 года также даны в [10]. Периоды прохождения фронтов связаны с нарушением стационарности в атмосфере, что приводит к резкому изменению профилей метеорологических параметров. Изучение хода метеорологических элементов в этом случае возможно только с помощью ВММ: сильные порывистые ветры, мощная низкая облачность иногда с интенсивными осадками не позволяют использовать другие средства измерения.

Возможность для исследования мезомасштабной структуры синоптических образований представляет близость к ВММ телевизионной башни в Останкино. По данным совместных одновременных измерений рассмотрены характеристики изменчивости полей метеорологических параметров в нижнем 300-метровом слое атмосферы в различных синоптических условиях. В.Г. Цверавой обнаружена зависимость между изменением высоты нижней границы облаков и временным ходом метеорологических элементов в 300-метровом слое. С.И. Коленкова и И.В. Литвинов рассматривали характеристики профилей температуры воздуха, скорости и направления ветра при туманах, а Ф.Я. Клинов и Э.Н. Новикова – при грозах и метелях. Все это подробно рассмотрено в [10].

Для измерений внутренних гравитационных волн (ВГВ) обычно используется измерительная сеть микробарографов (не менее трех), расположенных на некотором расстоянии один от другого, что позволяет определять не только их амплитуду, но и скорость, и направление их распространения. Длительные непрерывные наблюдения показывают, что внутренние волны с помощью такой сети отмечаются достаточно часто. При наблюдениях в Обнинске [11] внутренние волны отмечались по записям пульсаций температуры и компонентов скорости ветра. По характеру этих записей ВГВ можно разделить на волны с периодом 1–5 мин на фоне выраженной турбулентности и без нее, а также с периодом 7–30 мин с турбулентностью или без нее. Анализировались спектры пульсаций температуры, компонент скорости ветра и пульсаций давления в устойчиво стратифицированном АПС. Была разработана методика идентификации волновых возмущений. Для полученных спектров характерны четко выраженные максимумы всех компонент в одной и той же области частот $0,003 < f < 0,004$. Оценка дисперсий пульсаций атмосферного давления в диапазоне периодов 1–3 мин по данным многосуточных наблюдений показала, что они имеют

четко выраженный суточный ход. Амплитуда флуктуаций изменяется в 5–10 раз и имеет максимум в послеполуденное время. Были получены количественные оценки связи между пульсациями давления в волновом и турбулентном (мелкомасштабном) диапазонах спектра. При прохождении ВГВ наблюдаются четкие согласованные максимумы в авто- и взаимных спектрах и высокая когерентность на соответствующих частотах.

Наблюдения за гололедно-изморозевыми отложениями проводились на ВММ в 1964–1968 гг. под руководством Ф.Я. Клинова и подробно описаны в [33]. Эти наблюдения имеют большую ценность, так как в 300-метровом слое атмосферы при сопровождении детальными метеорологическими измерениями они нигде ранее не проводились. Было обнаружено, что наибольшие отложения (зернистая изморозь, смесь ее с гололедом) связаны с низкой облачностью и туманами. На нижних уровнях до 25 м отложения при этом почти отсутствуют, а на высотах могут достигать очень больших значений. Кристаллическая изморозь при радиационном выхолаживании значительно менее опасна с точки зрения нагрузки, а профили ее величины имеют максимум внутри 300-метрового слоя. Получены максимальные за 4 года значения веса отложений на стандартный образец (стержень диаметром 15 мм) в расчете на один погонный метр при различных погодных условиях. При этом максимальные значения веса отложений на тросах верхних уровней мачты достигали 17 кг/м.

Многие из работ, перечисленных выше, имеют существенное прикладное значение для решения практических задач. В [12] проведено сравнение максимальных месячных скоростей ветра на высоте 300 м, полученных путем выборки из ежечасных и четырехсрочных наблюдений. По обеим выборкам определены расчетные скорости ветра (максимальные, возможные один раз в 10 и 20 лет). Оказалось, что расчетные скорости, полученные по ежечасным наблюдениям, на 2 м/с больше, чем полученные по 4 срочным сетевым аэрологическим наблюдениям. В связи с интенсивным строительством высотных сооружений важную роль при их проектировании играет учет динамических ветровых нагрузок, которые могут составлять до 50–70 % среднего статистического напора. В связи с этим на ВММ проводились исследования структуры ветра при больших скоростях [34], законов распределения скорости ветра и пространственно-временных корреляционных функций [10, 12]. Оценки масштабов турбулентности

и показателя степени в степенном законе профиля ветра, полученные на ВММ, использованы в [7]. (Репринт статьи приведен в настоящем сборнике на с. 208–216.) В строительной метеорологии для расчета динамической составляющей ветрового напора часто используют коэффициент порывистости [12]. По материалам наблюдений определены характеристики профилей направления ветра, средние вертикальные и максимальные повороты ветра в пределах 300-метрового слоя, получена связь этих поворотов со временем года и суток [12]. Полученная ранее модель расчета порывов скорости ветра по характеристикам турбулентности квазистационарного потока адаптирована к нестационарному случаю (резкое усиление ветра при прохождении кучево-дождевого облака) [12]. Получены соотношения для оценки параметров максимальных значений порывов по характеристикам диссипации турбулентной энергии. В [7] по данным ежечасных круглосуточных измерений скорости и направления ветра на трех уровнях ВММ за 10 лет решается задача восстановления профиля ветра в слое 300 м по измерениям у земли.

Оценки вертикальных сдвигов ветра по материалам измерений на ВММ для использования в авиации при расчете посадки и взлета самолетов приведены в [28]. Максимальные значения этих градиентов получены на ВММ [25]; для этой цели использованы также данные малоинерционных измерений скорости ветра. В [10] также рассматриваются эмпирические связи между горизонтальной и наклонной видимостью в нижних 50 м. Одной из важных характеристик турбулентности атмосферы является микроструктура температурного поля. Температурные пульсации турбулентного происхождения определяют флуктуации плотности, которые сильно влияют на распространение радиоволн в атмосфере, нахождение лазерного луча. Профили температуры и влажности были использованы Э.Е. Вяльцевой [7] для расчета и типизации профилей коэффициента преломления радиоволн УКВ-диапазона в летнее время. В [10] рассмотрены также данные измерения структурного показателя пульсаций температуры для определения флуктуаций показателя преломления волн оптического диапазона.

Необходимо отметить, что в период работы в отделе Е.К. Гаргера (1996–1992 гг.) значительное время посвящалось экспериментальным работам по исследованию закономерностей турбулентной диффузии в приземном и пограничном слоях атмосферы.



Е.К.Гаргер

Е.К. Гаргер большое внимание уделял разработке методов экспериментального исследования турбулентной диффузии в атмосфере. Для изучения процесса диффузии обычно используют подходящие трассеры, с помощью которых метят воздушные частицы. При этом в одних случаях следят за ними в пространстве и во времени (это лагранжев метод), в других – измерения выполняются в фиксированных точках пространства (это эйлеров метод). В числе методов исследований, применяемых коллективом под руководством Е.К. Гаргера, были

метод стереосъемки дымовых струй, использование баллонов постоянного объема (тетронов), метод дымовых столбов. Особую сложность такая работа представляла в полевых условиях. В экспедиционных условиях Е.К. Гаргер с коллективом лаборатории изучал эйлеровы и лагранжевы характеристики дисперсии примеси при различных атмосферных условиях [13–24]. (Репринт статьи [24] приведен в настоящем сборнике на с. 229–235.) Большое внимание Е.К. Гаргер уделял созданию методик расчетов рассеяния примеси при различных условиях рассеяния (инверсии, неоднородная подстилающая поверхность). Для измерения параметров атмосферы в экспедициях датчики размещались на малых мачтах, особо эффектно выглядела подвеска гирлянды датчиков на длинном тросе под вертолетом Ми-8.

Измерительно-вычислительный комплекс ВММ по состоянию на 1987 год описан в [35]. (Репринт статьи приведен в настоящем сборнике на с. 220–228.) Современное состояние комплекса можно увидеть на интернет-сайте <http://typhoon-tower.obninsk.org>.

В завершение необходимо отметить, что современные информационные технологии давно уже используются при проведении измерений на ВММ: эти данные в реальное время свободно доступны на web-сервере <http://typhoon-tower.obninsk.org/ru/10-minute.asp>.

Список литературы

1. Александрова А.К., Бызова Н.Л., Машкова Г.Б. Опыт по распространению осаждающейся примеси от точечного источника в нижнем слое атмосферы // Исследование нижнего 300-метрового слоя атмосферы. М.: Изд-во АН СССР. 1963. С. 3–13.
2. Бызова Н.Л. Диффузия от точечного источника конечного времени действия // Изв. АН СССР, ФАО. 1969. Т.5, № 7.
3. Бызова Н.Л. О шероховатости по измерениям на высотной мачте ИЭМ // Труды ИЭМ. 1979. Вып. 23(88). С. 27–34.
4. Бызова Н.Л. О профилях ветра и мезошероховатости над неоднородной подстилающей поверхностью // Труды ИЭМ. 1987. Вып. 41(126).
5. Бызова Н.Л. Диффузия примеси в нижнем слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1970. Вып. 15.
6. Бызова Н.Л. Исследование турбулентной диффузии в нижнем слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 7. С. 96–103.
7. Бызова Н.Л., Вяльцева Э.Е. Результаты апробации инженерной модели пограничного слоя атмосферы по измерениям на высотной мачте // Труды ИЭМ, 1981. Вып. 27(100). С. 36–44. (Репринт статьи приведен на с. 208–216.)
8. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К. О соотношении между лагранжевыми и эйлеровыми турбулентными масштабами // Труды ИЭМ. 1970. Вып. 15.
9. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 277 с.
10. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К. Турбулентность в пограничном слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 267 с.
11. Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Мазурин Н.Ф., Хохлова А.В. Оценка параметров гравитационных волн и их связи с характеристиками нижнего слоя атмосферы // Изв. АН. ФАО. 1998. Т. 34, № 6. С. 799–807.
12. Бызова Н.Л., Кулижникова Л.К., Мазурин Н.Ф. Статистические характеристики порывов ускорений в фиксированной точке атмосферного потока // Труды ИЭМ. 1992. Вып. 55(155). С. 140–150.
13. Гаргер Е.К. Исследование поперечной диффузии от высотного источника примеси // Труды ИЭМ. 1970. Вып. 15. С. 66–85.
14. Гаргер Е.К. К оценке динамических характеристик баллонов постоянного объема (тетронов) // Труды ИЭМ. 1974. Вып. 7(45). С. 3–14.
15. Гаргер Е.К. Модель дымовой струи Гиффорда с использованием гипотезы подобия лагранжевой турбулентности в приземном слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 21(80). С. 3–15.
16. Гаргер Е.К. Экспериментальная оценка некоторых коэффициентов формул подобия для лагранжевых характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. ФАО. 1982. Т. 18, № 8. С. 787–796.
17. Гаргер Е.К. Расчет диффузионных характеристик поля концентрации невесомой примеси в приземном слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 29(102). С. 54–69.

-
18. Гаргер Е.К. Об оценке лагранжевых характеристик турбулентности в неустойчиво стратифицированном слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 33(108). С. 75–90.
 19. Гаргер Е.К. К оценке скорости и направления переноса примеси в пограничном слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1986. Вып. 37(120). С. 55–65.
 20. Гаргер Е.К. Интегральные лагранжевы характеристики турбулентности в пограничном и приземном слоях атмосферы // Труды ИЭМ. 1988. Вып. 46(136). С. 3–19.
 21. Гаргер Е.К., Жуков Г.П. О моментах вертикального распределения концентрации примеси в приземном слое атмосферы // Метеорология и гидрология. 1989. № 10. С. 54–60.
 22. Гаргер Е.К., Леман А. Измерение вертикальных диффузионных параметров по данным струй дыма // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14, № 2. С. 138–148.
 23. Гаргер Е.К., Найденов А.В., Уваров Д.Б. Исследование относительной поперечной диффузии по дымовым струям в приземном слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 21(80). С. 16–24.
 24. Гаргер Е.К., Найденов А.В., Уваров Д.Б. Поперечная абсолютная дисперсия координат частиц примеси в приземном слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 29(103). С. 82–88. (Репринт статьи приведен на с. 229–235.)
 25. Иванов В.Н. Использование высотной метеорологической мачты ИЭМ для изучения пограничного слоя атмосферы // Труды ИЭМ. 1970. Вып. 12, 144.
 26. Иванов В.Н. Исследование турбулентного режима пограничного слоя атмосферы с помощью измерительного комплекса высотной метеорологической мачты // Труды ИЭМ. 1971. Вып. 7. С. 104–113.
 27. Иванов В.Н., Мазурин Н.Ф. Законы распределений пульсаций скорости ветра в нижнем 300-метровом слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1972. Вып. 27.
 28. Иванов В.Н., Мазурин Н.Ф. Некоторые турбулентные характеристики пограничного слоя атмосферы, используемые в прикладных задачах // Материалы первой конференции по аэродинамике и аэроупругости высоких строительных сооружений. Изд-во ЦАГИ, 1973. С. 98–109.
 29. Иванов В.Н., Орданович А.Е., Петрова Л.И. Крупномасштабная структура и ее взаимодействие с мелкомасштабной турбулентностью в приземном слое // Изв. АН СССР. ФАО. 1971. Т. 7, № 3.
 30. Иванов В.Н., Орданович А.Е., Петрова Л.И. Некоторые особенности спектров температуры воздуха и горизонтальной компоненты скорости ветра в низкочастотном диапазоне при конвекции // Изв. АН СССР. 1973. Т. 9, № 8. С. 787–799.
 31. Иванов В.Н., Стратонович Р.Л. К вопросу о лагранжевых характеристиках турбулентности // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1963. № 10.
 32. Иванов В.Н., Ингель Л.Х. Об одном механизме усиления когерентных структур в неоднородно запыленной атмосфере // Труды ИЭМ. 1992. Вып. 55(155). С. 120–122. (Репринт статьи приведен на с. 217–219.)
 33. Клинов Ф.Я. Изморозь и гололед в нижнем 300-метровом слое атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 67 с.
 34. Мазурин Н.Ф., Шинкарева Т.А. Профили больших скоростей ветра по измерениям на метеорологической мачте в г. Обнинске // Труды ИЭМ. 1992. Вып. 55(155). С. 84–96.
 35. Мазурин Н.Ф. Измерительно-вычислительный комплекс высотной метеорологической мачты ИЭМ // Труды ИЭМ. 1987. Вып. 10(131). С. 9–17. (Репринт статьи приведен на с. 220–228.)

A photograph of the aurora borealis (northern lights) in shades of green and blue, dancing across a dark sky. Below the lights, the dark silhouette of a mountain range is visible against a lighter, hazy horizon.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

Ю.И. Портнягин, А.А. Югаков, Е.Г. Мерзляков,
В.Г. Чкалов

Смомента создания Института экспериментальной метеорологии одним из важных направлений его деятельности стала разработка наземных радиофизических и ракетных средств и методов исследования верхней атмосферы и ионосферы Земли. Для проведения этих исследований был создан отдел физики верхней атмосферы под руководством Л.А. Катасева.

Основными задачами этого отдела явились разработка методов и технических средств диагностики и прогноза геофизических параметров верхней атмосферы и ионосферы, разработка соответствующих моделей



*Основатель отдела
физики ВА
профессор
Л.А. Катасев*



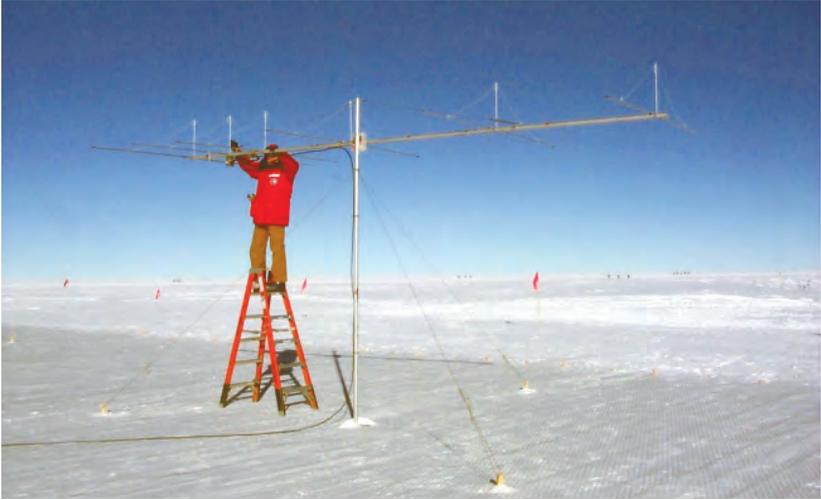
*Сотрудники отдела физики верхней атмосферы
в период его становления*

геофизических процессов применительно к проблеме прогноза погоды и долгосрочных изменений климата. История развития этих исследований и основные научные результаты приведены ниже.

Исследования ветрового режима в верхней атмосфере методом радиолокации метеорных следов

В 1963 г. по инициативе Л.А. Катасева А.Д. Орлянским и В.Н. Корпусовым была разработана и изготовлена радиолокационная станция для измерения скоростей ветра на высотах 80–100 км методом радиолокации метеорных следов. Этот метод основан на измерении доплеровского эффекта сигналов, отраженных от ионизированных метеорных следов, образующихся в результате постоянного вторжения в верхнюю атмосферу метеорных частиц. Важным достоинством метода является возможность проведения круглосуточных измерений скоростей ветра в верхней атмосфере независимо от погодных условий.

Первые измерения с помощью таких станций были проведены в 1964–1968 гг. в обсерватории на о. Хейса (архипелаг Земля Франца-Иосифа) и в Обнинске. В дальнейшем исследования этим методом проводились в нашем институте под руководством И.А. Лысенко. В 1967 г. аналогичная радиометеорная станция была установлена на станции «Молодежная» (Антарктида) [11]. (Репринт работы приведен на с. 236–251.)



*Монтаж антенны метеорной РЛС «КОБРА» на Южном полюсе
Н.А. Макаровым (станция «Амундсен-Скотт»)*

В 80-е годы И.А. Лысенко, Н.А. Макаровым и Б.И. Петровым разработаны сетевые метеорные РЛС «Циклон», которые были установлены для проведения регулярных измерений ветра в верхней атмосфере в различных географических пунктах: Обнинск, Волгоград, Хабаровск, ст. Молодежная, Ашхабад, Кюлунгсборн (ГДР), Ямбол (Болгария). В результате этих измерений был получен большой объем данных, позволивший установить многие закономерности климатического режима ветра в верхней атмосфере. Эти исследования позволили ученым ИЭМ завоевать значительный авторитет в России и за рубежом [7, 8]. В Обнинске в 80-е – 90-е годы было проведено 5 всесоюзных конференций, посвященных обсуждению результатов исследований в области динамики верхней атмосферы. В рамках программы международного сотрудничества «Интеркосмос» был выполнен большой цикл совместных исследований с учеными ГДР, НРБ, Франции. По инициативе ученых США были организованы уникальные длительные измерения с помощью совместно разработанной радиометеорной РЛС «КОБРА» (Колорадо-Обнинск Радар) на американской станции «Амундсен-Скотт» (Южный полюс) [15, 16, 26, 27]. Эти измерения проводились сотрудником ИЭМ Н.А. Макаровым.

Развитию исследований в области динамики верхней атмосферы способствовал ряд многочисленных отечественных и международных грантов (РФФИ, ИНТАС и др.). Научные сотрудники ИЭМ (Ю.И. Портнягин, Е.Г. Мерзляков, Н.А. Макаров) неоднократно приглашались в ряд ведущих зарубежных научных центров для проведения совместных научных исследований: (Бостонский университет, Университет Колорадо, Национальный центр атмосферных исследований (США), Лейпцигский и Кельнский университеты (Германия), Университет Торонто (Канада), Университет Фукуоки (Япония)). Результаты этих исследований многократно публиковались в авторитетных отечественных и международных изданиях (всего более 200 научных статей и две монографии).

Дальнейшему развитию радиометеорных исследований в ИЭМ способствовало принятие в 2008 г. Федеральной целевой программы «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008–2015 годы». Для выполнения этой программы в ИЭМ была разработана и изготовлена многофункциональная радиометеорная станция МК-31, в которой использованы новая элементная база, новые алгоритмы обработки данных измерений и система оперативной передачи этих данных в центр сбора данных. Станциями МК-31 были оснащены ряд сетевых подразделений Росгидромета. В настоящее время такие станции расположены в следующих географических пунктах: Обнинск, Ангарск, Петро-

павловск-Камчатский, Кандалакша, Норильск, Тикси, Анадырь.

Можно отметить следующие наиболее важные научные результаты, полученные в ИЭМ в области исследований динамических процессов в верхней атмосфере [14, 23, 25].

Впервые получены уникальные по продолжительности многолетние ряды данных



*Общий вид радиолокационного комплекса
МК-31*

измерений параметров ветрового режима верхней атмосферы в различных регионах земного шара, в том числе в Арктическом и Антарктическом регионах;

На основании анализа многолетних данных радиометеорных измерений параметров ветрового режима в верхней атмосфере на сети отечественных и



Аппаратный бокс радиолокационного комплекса МК-31

зарубежных станций, дополненных данными других радиофизических измерений и данными спутникового зондирования, построена глобальная эмпирическая климатическая модель преобладающего ветра и параметров приливных колебаний в области мезопаузы нижней термосферы (МНТ). Эта модель задает распределение значений скоростей ветра на высотах 80–100 км с шагом 1 км для любого времени суток и месяцев на различных высотах для интервала широт 90° с.ш. – 90° ю.ш. с шагом $2,5^\circ$.

С использованием разработанной модели построена полуэмпирическая модель вертикального ветра в верхней атмосфере, которая позволила выявить существование изменяющихся с сезоном года глобальных ячеек циркуляции в верхней атмосфере. Характерные среднемесячные значения скоростей вертикального ветра составляют 2–3 см/с, что свидетельствует о важной роли высотно-широтной циркуляции в балансе энергии и импульса, а также в процессе переноса малых газовых составляющих в верхней атмосфере.

Построена полуэмпирическая глобальная климатическая модель значений температуры, давления и плотности средней атмосферы (высоты 20÷100 км).

По данным уникальных радиометеорных измерений на Южном полюсе впервые экспериментально обнаружен немигрирующий полусуточный прилив с зональным волновым числом $S=1$.

Выявлены закономерности межсуточных вариаций горизонтального ветра в МНТ-области. Среди межсуточных крупномасштабных волновых движений в верхней атмосфере выделяются

волны Россби с периодами, близкими к собственным колебаниям изотермической атмосферы без ветра (около 2, 5, 10 и 15 суток). Показано, что существует значительная сезонная изменчивость спектров межсуточных колебаний преобладающего ветра, причем спектры колебаний зонального и меридионального ветра существенно различны, что обусловлено различной широтной структурой колебаний. Длительные ряды данных проведенных в ИЭМ радиометеорных измерений позволили выявить долговременные тенденции изменения параметров ветрового режима МНТ-области. Было установлено, что, несмотря на то, что сезонный ход величин преобладающего ветра и параметров приливных колебаний ветра среднеширотной и высокоширотной зон повторяется из года в год, существует статистически значимое долговременное изменение различных параметров ветрового режима на фоне сильных межгодовых вариаций. Было показано, что модель линейного тренда не является корректной при описании долговременных тенденций параметров ветрового режима в области МНТ. Впервые показано, что непостоянство параметров долговременных трендов (например, скорость изменения значений) преобладающего ветра и амплитуд полусуточного прилива на высотах 80–100 км МНТ и их резкие изменения в определенные годы связаны с динамическими процессами в стратосфере и тропосфере.

Эмпирически и численно исследованы особенности возникновения и нелинейного распространения планетарных волн и приливов в мезосфере и нижней термосфере. Показано, что регулярные по времени периоды усиления волновой активности в среднеширотной и высокоширотной летней области МНТ связаны с нелинейным взаимодействием квазидвухсуточной волны и планетарных волн в средней атмосфере. Численно смоделированы наблюдаемые в области МНТ изменения преобладающего ветра при неустойчивости зонального струйного течения в стратосфере.

Показано, что планетарные волны и внутренние гравитационные волны (ВГВ), распространяющиеся из нижних слоев атмосферы в верхние, ответственны за связь динамики верхней и нижней атмосферы. Сезонный переход зима–лето в стратосфере связан с финальным потеплением и разрушением полярного вихря. Время, когда происходит это разрушение, зависит от происходящих в средней атмосфере волновых процессов, влияние

которых на динамику атмосферы распространяется вплоть до высот области МНТ. Было установлено, что перестройка циркуляции от зимнего типа к летнему в области МНТ связана с динамикой полярного вихря в стратосфере.

Начало перехода летней циркуляции в области МНТ к осенней оказалось связано с интенсивностью ВГВ и коррелирует с изменчивостью динамических процессов в тропосфере.

Ракетные исследования верхней атмосферы

Одним из основных направлений работ ИЭМ с начала его образования являлось исследование верхней атмосферы Земли прямыми измерениями геофизических параметров верхней атмосферы с помощью приборов, установленных на борту ракеты, и развитие методов изучения верхней атмосферы с помощью искусственных светящихся облаков (ИСО) и искусственных ионизированных облаков (ИИО) [20].

В продолжение работ, начатых в ИПГ еще в конце 50-х годов, ученые ИЭМ с середины 1960-х годов проводили исследования параметров верхней атмосферы методами ИСО и ИИО. Над этой тематикой в этот период в Обнинске работали три небольшие группы: группа оптических наблюдений ИСО (Л.А. Андреева, Д.Б. Уваров и другие), группа радиофизических наблюдений ИИО (В.В. Рыбин и другие), группа лабораторных исследований (В.Н. Балабанова и другие).

Основной вклад в разработку методов и аппаратуры для ракетных измерений температуры и плотности верхней атмосферы с применением ИСО, обобщения и интерпретации данных внесли Л.А. Катасев, Л.А. Андреева, О.Ф. Ключев.

В эти же годы начались разработки методик вычисления скорости ветра (Д.Б. Уваров) и коэффициента молекулярной диффузии (Л.А. Андреева), создавался комплекс фотографической и измерительной аппаратуры и организовывались фотографические пункты наблюдений ИСО в районах полигона Капустин Яр и о. Хейса.

Первые эксперименты с ИСО на о. Хейса, в которых участвовали сотрудники ИЭМ (Д.Б. Уваров и другие), были проведены в октябре 1967 года. Группой В.Н. Балабановой велась подготовка к проведению опытов с выбросом этилена и четыреххлористого углерода для исследования состава верхней атмосферы на

высотах выбросов. Группа В.Ф. Чепуры участвовала в проведении в 1967 году на полигоне Капустин Яр эксперимента с образованием ионизированного облака цезия.

Из всех ракетных методов, позволяющих измерять параметры ветра на высотах более 100 км, метод ИСО наиболее эффективен. Он позволил получить практически мгновенные профили ветра в большом интервале высот.

Для создания ИСО в атмосферу инжестировались пары щелочных металлов (Na, Li, Ba, Sr, K), окись азота, этилен; триметилалюминий, аэрозоли и т.д.

В течение 1970–1980 гг. эти направления бурно развивались и расширялись, увеличивалось количество и качество проводимых экспериментов, объема получаемых экспериментальных данных, методик обработки результатов, разрабатывались модели физико-химических процессов, происходящих при проведении активных экспериментов в ВА и ОКП.

Выбор реагента и характер его инъекции (импульсный или непрерывный) определялся задачами конкретного эксперимента. Для измерений скорости и направления ветра и турбулентности при помощи ракет комплексов МР-12 и МР-20, как правило, ученые ИЭМ в сумерки использовали выбросы в освещенные солнцем слои атмосферы паров щелочных металлов, а в сумерки и ночью – выбросы жидкой смеси триметилалюминия и триэтилалюминия (ТМА/ТЭА).

Параметры ветра методом ИСО определялись по изменению со временем положения ИСО в пространстве. ИСО фотографировались на фоне ночного или сумеречного неба, их положение определялось относительно звезд, координаты которых известны по разработанной в ИЭМ методике. Для определения пространственных координат ИСО фотографировались с двух или более разнесенных наблюдательных пунктов. Наблюдения и фотографирование ИСО осуществлялись при помощи наземных комплексов регистрирующей аппаратуры: широкоформатных фотокамер, телекамер, электронно-оптических преобразователей, систем привязки к единому времени и т. д.

Метод ИСО, широко применявшийся при измерениях скорости и направления ветра при помощи ракет, позволил одновременно получить информацию о коэффициенте турбулентной диффузии на высотах 80–120 км и коэффициенте молекулярной диффузии на больших высотах. Методики получения этой новой

дополнительной информации основаны на специальной обработке фотоснимков ИСО и изложены в работах ИЭМ.

Коэффициент турбулентной диффузии – одна из основных характеристик турбулентности атмосферы, а коэффициент молекулярной диффузии позволяет определять плотность атмосферы на высотах более 120 км и прямо оценивать скорость диффузионного расплывания облаков при моделировании процессов распространения антропогенных загрязнений в термосфере. Этим объясняется важность и необходимость экспериментально определять их ход по высоте и широте при различных геофизических условиях.

Точность диффузионных измерений по ИСО, как правило, низка и зависит в каждом эксперименте от многих факторов: условий освещенности, качества фотоснимков, размытости границ ИСО и т.д. Средняя погрешность диффузионных измерений по фотоснимкам ИСО не превышает 25–30 %, хотя в отдельных случаях при плохих условиях наблюдения может быть больше [2–4, 22].

Экология верхней атмосферы

Значительное внимание в проводимых ИЭМ исследованиях было уделено проблеме экологии верхней атмосферы и околоземного космического пространства. В 70-е годы В.Н. Лебединец разработал всеобъемлющую физическую модель распределения и притока космической пыли в атмосферу Земли. В рамках этой модели были проведены оценки средней величины притока космической пыли на Землю и возможные отклонения притока от этой средней величины, а также распределение пылинок по массам и размерам; определено распределение векторов скоростей пылинок и распределение орбит пылинок в Солнечной системе; рассчитано влияние гравитационного и электромагнитного полей Земли и аэродинамического торможения в атмосфере на изменение векторов скорости пылинок с различными массами и скоростями в зависимости от их расстояния от Земли; разработан алгоритм расчета концентрации или плотности потока пылинок разных масс на различных высотах и географических широтах для всех времен года и суток.

При построении этой модели были использованы уникальные результаты радиометеорных измерений орбит метеоров,

проведенных в ИЭМ В.Н. Корпусовым под руководством В.Н. Лебединца [10].

В 80-х годах получило интенсивное развитие ответвление метода изучения верхней атмосферы с помощью искусственных светящихся облаков в виде исследования эволюции и влияния пылевых облаков на процессы в верхней атмосфере и околоземном пространстве.

В широкой кооперации с другими НИИ проводились комплексные лабораторные и натурные эксперименты по моделированию различных факторов воздействия ОКП на элементы и материалы КА. Для проведения наземных экспериментов использовались специально созданные стенды и генераторы потоков частиц, диагностические и наблюдательные средства. Также проводились натурные эксперименты в условиях, максимально приближенных к условиям существования реальных КА – с применением специализированных головных частей для ракет МР-12 и МР-20, включающих как средства генерации искусственных облаков, так и средства диагностики воздействия, специальных платформ для размещения опытных образцов материалов. При проведении натурных экспериментов, помимо оборудования, устанавливаемого на борту ракеты, использовались наземная наблюдательная инфраструктура в виде нескольких оптических фотографических и телевизионных комплексов, радиоизмерительные и радиолокационные комплексы.

Большую роль в успешности проведенных работ сыграли опыт и изобретательность групп подготовки экспериментов, обеспечения наблюдения и обработки данных, разработавших огромное количество схем и методов проведения пусков и их наблюдений, обработки и интерпретации данных [1].

Основную роль в организации и проведении необъятного фронта работ по экспериментальному моделированию факторов воздействия ОКП на элементы и материалы КА сыграли коллективы, возглавляемые О.Ф. Ключевым, А.И. Кашириным, А.М. Казанниковым.

На базе разработанных в ИЭМ моделей эволюции газовых, пылевых, ионизированных облаков в верхней атмосфере в конце 80-х годов – начале 90-х годов были выполнены работы по моделированию экологического воздействия ракетно-космической техники (РКТ) на верхнюю атмосферу и ОКП и предложены возможные варианты уменьшения такого воздействия [9, 21].

Обобщенные результаты этих многолетних исследований, характеристики и описание конструкций использовавшихся технических средств и методик измерений содержатся в монографии ученых ИЭМ «Исследование процессов в верхней атмосфере методом искусственных облаков» [5]. Работы по моделированию влияния факторов пылевого загрязнения ОКП на космическую технику, проводившиеся в НПО «Тайфун», были обобщены в сборнике «Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов» [12, 13].

Исследования ионосферы с использованием геофизических ракет

Прямыми измерениями геофизических параметров верхней атмосферы с помощью бортовых приборов занимались А.Д. Жлудько и Ю.К. Часовитин совместно с другими научными сотрудниками групп, которые они возглавляли. С 1965 года измерения ионного состава ионосферы масс-спектрометрическим методом в массовом порядке стали проводиться с помощью ракет комплекса МР-12. В конце 1960-х гг. были получены данные об ионном составе среднеширотной и полярной ионосферы, составе нейтральной атмосферы.

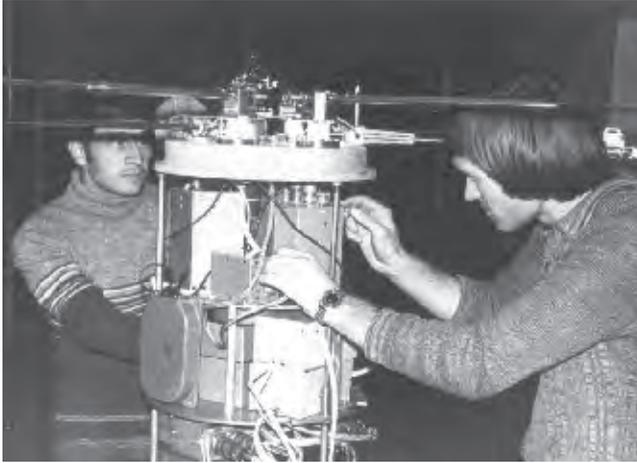
В 1965 году под руководством Ю.К. Часовитина начали проводить прямые измерения ионосферных параметров с помощью приборов, установленных на борту геофизических ракет. С этой целью были разработаны в 1966–1970 гг. прибор для измерения температуры электронов T_e «зонд Ленгмюра» (Ю.Б. Бураков, В.И. Стяжкин, Ю.К. Часовитин, а Г.П. Комраковым – «высокочастотный импедансный зонд» для измерения концентрации электронов N_e . Для работы в тонких спорадических E -слоях в условиях искусственных и естественных неоднородностей ионосферы (возмущенная полярная ионосфера), с учетом значительной скорости ракеты, требовалось большее быстроедействие аппаратуры, ее высокое разрешение по времени и высоте. С этой целью вышеупомянутые приборы были подвергнуты глубокой модернизации. Для измерения температуры электронов T_e был создан измеритель «БРИЗ-Т» (В.Г. Чкалов). Этот прибор получился в шесть раз легче и в пять раз компактнее своего предшественника. Существенному усовершенствованию подвергся

и высокочастотный импедансный зонд для измерения концентрации электронов Ne, получивший название ЗИ-1 (Е.А. Разгуляев, В.Г. Чкалов). Позже была создана его более продвинутая версия ЗИ-2. При измерениях прибором ЗИ-2 было достигнуто хорошее разрешение по времени и высоте полета (десятки метров).

Для проведения активных экспериментов в ионосфере и исследований закономерностей динамики искусственных и естественных неоднородностей (особенно в полярной области) был разработан и изготовлен прибор «ПИТОН» для измерения ионной и электронной температур и концентрации ионов (В.Г. Чкалов). В спокойных условиях (например, в экваториальных и средних широтах) прибор давал возможность измерять и температуру нейтральных частиц. Упомянутые приборы занимали призовые места в конкурсах разработок ИЭМ соответственно в 1984 и 1986 гг. В этой бортовой аппаратуре применялись как внедренные заимствованные изобретения, так и широко использовались собственные изобретения, три из которых были запатентованы НПО «Тайфун». Эти изделия выдержали суровые испытания в полярных условиях о. Хейса (Земля Франца-Иосифа, обсерватория им. Э.Т. Кренкеля), где были проведены в 1986 г. двенадцать ракетных экспериментов. Не менее хорошо зарекомендовали себя наши приборы и в самом продолжительном 51-м рейсе на НИС «Профессор Визе», который проходил через три океана в Чукотское море, где проводились эксперименты по модификации полярной ионосферы. В этом рейсе работали сотрудники ИЭМ В.Н. Корпусов, Н.С. Михович, В.Г. Чкалов. Во всех ракетных пусках были получены принципиально новые результаты, получившие высокую оценку научной общественности.

В конце 80-х годов для дальнейших исследований верхней атмосферы предполагалось разработать бортовой гироплазменный зонд. Кроме того, поскольку в возмущенной и искусственно модифицированной ионосфере поведение частиц не всегда подчиняется максвелловскому распределению, была предпринята попытка создать устройство, которое позволяло бы непосредственно измерять саму функцию распределения частиц. Был получен значительный научный задел. Однако с началом перестройки ракетные эксперименты и разработки диагностических ионосферных приборов были приостановлены.

Следует отметить международное сотрудничество и научную кооперацию в исследовании верхней атмосферы и



*Подготовка головной части ракеты МР-12
(справа – сотрудник ИЭМ В.Г. Чкалов)*

ионосферы (например СССР–Франция и СССР–Республика Куба). В 1983 году сотрудники ИЭМ В.Ф. Гарбузенко, А.И. Каширин, В.Г. Чкалов вместе с группой французских геофизиков вышли из порта города Гавр в атлантический ракетный рейс на НИС «Профессор Визе» и успешно провели ионосферные эксперименты. Несколько ранее успешно осуществлялось научно-техническое российско-французское сотрудничество во время полярной экспедиции 1978–1979 гг. на о. Хейса, Земля Франца-Иосифа. На станции ракетного зондирования была проведена серия пусков ракет в моменты максимальной возмущенности ионосферы. Французская сторона отвечала за



*Запуск ракеты комплекса МР-12
с научно-исследовательского судна
«Профессор Визе»*

измерения с борта МР-12 электрических полей в возмущенных условиях. Это осуществлялось посредством блока электроники и металлографитовых шаров-датчиков, разнесенных на тросах центробежной силой вращающейся ракеты. В этих совместных экспериментах сотрудники ИЭМ А.И. Каширин, В.Г. Хрюкин, В.Г. Чкалов проводили измерения концентраций и температур заряженных частиц. Летом 1991 года на корабле «Профессор Зубов» в рамках межгосударственного сотрудничества СССР–Республика Куба были успешно проведены совместные эксперименты в Атлантическом океане. Со стороны ИЭМ в работах участвовали Т.В. Буздыгар, Ю.В. Голубев, В.П. Есин, А.И. Каширин, О.Ф. Ключев, В.Г. Чкалов [24].

Начиная с середины 1960-х и до начала 1970-х годов было осуществлено около 100 успешных ракетных экспериментов на станциях ракетного зондирования М-202 (Капустин Яр), на о. Хейса и кораблях науки. По мере накопления экспериментальных данных возникла настоятельная необходимость их систематизации, осмысления и поиска общих закономерностей поведения ионосферы в различных гелиогеофизических условиях [17]. Под руководством Ю.К. Часовитина группой сотрудников (С.Е. Иванова, А.И. Каширин, Е.А. Карякина, Н.М. Ключева, Л.С. Миронова, Т.Н. Сыкилинда и В.Б. Шушкова) были начаты разработки моделей ионосферы. С использованием результатов собственных экспериментов, а также с привлечением данных (преимущественно американских и японских ракетных пусков) об ионосферных профилях концентрации, температуры электронов и других параметров и некоторых наземных станций были построены эмпирические модели ионосферы для средних широт и до высоты 200 км. Эмпирические модели, строящиеся на базе большого количества экспериментальных данных, кроме прогностической ценности обладают еще и тем практическим критерием, по которому проверяются другие модели ионосферы – теоретические и полуэмпирические [18]. (Репринт работы приведен на с. 252–276.)

Опираясь на предшествующую международную «Модель нейтральной атмосферы ЯККИА-77» и модель «Международной справочной ионосферы IRI-82», группа Ю.К. Часовитина разработала «Глобальную эмпирическую модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере» (СМИ-85). Позже была создана



Коллектив разработчиков комплекса МР-30 с ракетой, подготовленной для проведения летных испытаний

глобальная «Справочная модель ионосферы-88», которая послужила прообразом будущего ГОСТа по ионосфере. Все усилия коллектива были направлены на то, чтобы создать стандарт, который предназначался для оценки ионосферных условий функционирования существующих и проектируемых средств радиосвязи, радиолокации, радионавигации, а также для оценки воздействия заряженных частиц на объекты, функционирующие в ионосфере Земли. Поставленная цель была достигнута, и новый стандарт вошел в действие [6, 16, 19].

В 2015 году была завершена разработка модернизированного варианта геофизической ракеты (в составе комплекса МР-30), позволяющая доставить полезную нагрузку с массой не менее 150 кг до высоты порядка 300 км. Использование новой ракеты существенно расширяет возможности проведения как диагностических измерений, так и активных экспериментов в верхней атмосфере, ионосфере и околоземном космическом пространстве, направленных на решение широкого класса научных и прикладных задач.

Список литературы

1. Авдюшин С.И., Клюев О.Ф. и др. Предварительные результаты исследований искусственных образований в ионосфере по проекту CRRES // Космические исследования. 1993. Вып. 1(31). С. 71.
2. Андреева Л.А., Вугмейстер Б.О. и др. Результаты одновременных наблюдений ветра в стратосфере, мезосфере и нижней термосфере // Труды ИЭМ. 1972. Вып. 1(34). С. 3–9.
3. Андреева Л.А., Катасев Л.А. Исследование динамики верхней атмосферы с помощью светящихся облаков в Волгограде // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 15(3). С. 6–34.
4. Андреева Л.А., Катасев Л.А., Щука Т.И. Ветер в полярной шапке и авроральном овале на высотах 90–190 км на о. Хейса. Исследование динамических процессов в верхней атмосфере // Труды IV Всесоюзного совещания. М.: Гидрометеиздат, 1985. С. 34–42.
5. Андреева Л.А., Клюев О.Ф., Портнягин Ю.И., Хананьян А.А. Исследование процессов в верхней атмосфере методом искусственных облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 176 с.
6. ГОСТ 25645.146–89. Ионосфера Земли. Модель глобального распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов. М.: Изд-во стандартов, 1990. 812 с.
7. Дьяченко В.А., Лысенко И.А., Портнягин Ю.И. Климатический режим ветра нижней термосферы. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 1986. 113 с.
8. Измерения ветра на высотах 90–100 км наземными методами. Под ред. Ю.И. Портнягина, К. Шпренгера. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 343 с.
9. Казанников А.М., Кайдалов О.В. Эволюция пылевого облака в верхней атмосфере // Труды ИЭМ. 1990. Вып. 21(143). С. 97–102.
10. Лебединец В.Н. Разработка физической модели пылевой составляющей верхней атмосферы и космического пространства // Проблемы метеорологии: сборник статей под ред. В.П. Тесленко. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. С. 96–106.
11. Лысенко И.А., Орлянский А.Д., Портнягин Ю.И. Исследование динамики атмосферы на высотах 80–100 км радиометеорным методом // Труды ИЭМ. 1982. Вып. 15(111). С. 35–50. (Репринт работы приведен на с. 236–251.)
12. Портнягин Ю.И., Клюев О.Ф., Петров Н.Н., Тесленко В.П. Основные направления исследований влияния загрязнения околоземного космического пространства на функционирование элементов систем

космических аппаратов // Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов: сборник трудов. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 4–10.

13. Портнягин Ю.И., Ключев О.Ф., Шидловский А.А. и др. Ракетные эксперименты по моделированию воздействия компонентов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на материалы и системы космических аппаратов // Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов: сборник трудов. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 10–18.

14. Портнягин Ю.И., Мерзляков Е.Г., Соловьева Т.В., Макаров Н.А. Исследования динамических процессов в верхней атмосфере радиометорным методом // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сборник статей под ред. А.Ф. Нерушева. Том 1. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. С. 201–217.

15. Портнягин Ю.И., Макаров, Е.Г. Мерзляков, Дж.М. Форбс. Основные закономерности внутрисуточных колебаний ветра в нижней термосфере над Южным полюсом // Доклады РАН. 1996. Т. 349, № 1. С. 104–105.

16. Справочная модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере на высотах ниже 200 км. Справочная модель ионосферы-83. Под ред. Ю.К. Часовитина. Обнинск: ИЭМ, 1983. 133 с.

17. Часовитин Ю. К., Нестеров В. П. Динамические процессы и формирование ночной области E ионосферы // Труды ИЭМ. 1975. Вып. 3(55). 143 с.

18. Часовитин Ю.К. Эмпирические модели электронной концентрации и электронной температуры // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 13(102). С. 3–27. (Репринт работы приведен на с. 252–276.)

19. Часовитин Ю.К., Широчков А.И., Беспрозванная А.С. и др. Глобальная эмпирическая модель распределения концентрации, температуры и эффективной частоты соударений электронов в ионосфере // Ионосферные исследования. М.: Наука, 1988. № 44. С. 6–13.

20. Шидловский А.А. Метеорологические ракетные комплексы СССР и исследования атмосферы на высотах до 250 км. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 192 с.

21. Юдаков А.А., Ключев О.Ф., Кайдалов О.В. Моделирование эволюции пылевых образований в околоземном космическом пространстве и верхней атмосфере // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сборник статей под ред. А.Ф. Нерушева. Том 1. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. С. 218–236.

22. Andreeva L.A., Katasev L.A., Uvarov D.B. Winds over Heiss Island from artificial luminous cloud observations // Phil. Trans. Roy. Soc. London. 1972. Vol. A271. P. 559–562.

23. Jacobi Ch., Hoffmann P., Liu R.Q., Križan P., Laštovička J., Merzlyakov E.G., Solovjova T.V., Portnyagin Yu.I. Midlatitude mesopause region winds and waves and comparison with stratospheric variability // *J. of Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.* 2009. Vol. 71, N 14/15. P. 1540–1546.

24. Klueva N.M., Chasovitin Yu.K., Khrukin V.G. et al. Rocket measurements of electron concentration and electron temperature in the polar ionosphere // *Space Res.* 1973. Vol. 13. P. 535–539.

25. Merzlyakov E., Jacobi C., Portnyagin Yu.I., Solovjova T.V. Structural changes in trend parameters of the MLT winds based on wind measurements at Obninsk // *J. of Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.* 2009. Vol. 71. P. 2631.

26. Portnyagin Yu.I., Forbes J.M., Makarov N.A., Merzlyakov E.G., Palo S.E. The summer time 12-h wind oscillation with zonal number $s=1$ in the lower thermosphere over the South Pole // *Annales Geophys.* 1998. Vol. 16. P. 827–837.

27. Portnyagin Yu.I., Forbes J.M., Makarov N.A. Unusual characteristics of lower thermosphere prevailing winds at the South Pole // *Geophys. Res. Lett.* 1997. Vol. 24, N 1. P. 81–84.



ФИЗИКА КЛИМАТА И КЛИМАТООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ

А.Ф. Нерушев

Современное изменение климата Земли и связанные с ним природные катаклизмы являются в настоящее время одной из основных глобальных проблем, стоящих перед человечеством. По мнению большинства ученых они обусловлены в основном изменениями газового и аэрозольного состава атмосферы, в том числе и за счет антропогенного фактора. В конце 60-х – начале 70-х гг. прошлого столетия проблема изменений и изменчивости климата не стояла так остро, как в настоящее время. Тем не менее уже тогда было ясно, что газовый и аэрозольный

состав атмосферы и их изменчивость требуют тщательного изучения и контроля.

Основы систематических исследований в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ) изменения газового и аэрозольного состава атмосферы как факторов, существенно влияющих на климатическую систему Земли, были заложены в 70-х – 80-х гг. прошлого столетия Владимиром Николаевичем Арефьевым, Сергеем Стефановичем Хмелевцовым и Владимиром Никифоровичем Лебединцом. Развитие таких исследований базировалось на мощной экспериментальной базе, которой уже в то время располагал ИЭМ, и на большом коллективе высококвалифицированных научных сотрудников, инженеров и техников. В настоящей статье кратко изложены основные вехи развития работ по этой проблематике в ИЭМ и затем в НПО «Тайфун».

Парниковые газы

Под руководством В.Н. Арефьева с конца 1960-х годов в ИЭМ начались исследования ослабления оптического излучения искусственными средами. Для этого на базе экспериментальных установок аэрозольного корпуса была создана оптическая многоходовая кювета с базой 50 м [4]. (Репринт статьи с описанием кюветы приведен в настоящем сборнике на с. 277–285.) Давление и температура в кювете могли изменяться и регулироваться в пределах $2 \cdot 10^{-4}$ торр – 5 атм. и 20–80 °С соответственно, а длина оптической трассы превышала 3 км. В то время это были уникальные показатели, и они долгое время оставались непревзойденными. На базе этой кюветы выполнен цикл исследований селективного и континуального поглощения излучения в окнах относительной прозрачности атмосферы [6, 7], результаты которых в дальнейшем были использованы в том числе в решении проблемы мониторинга парниковых газов в атмосфере.

В 1970-х годах в ИЭМ была разработана технология контроля состава атмосферы методом молекулярной солнечно-абсорбционной спектроскопии. Это классический метод, давно и успешно используемый для определения содержания в толще атмосферы малых газовых составляющих, в частности водяного пара, озона, метана, окиси и двуокиси углерода, закиси азота и др. Центральным элементом разработанной технологии был полевой спектральный комплекс (ПСК), созданный в кооперации с



Доктор физ.-мат. наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации В.Н. Арефьев (в центре) со своими коллегами Н.И. Сизовым и Ф.В. Кашиным в лаборатории, 2013 год

Институтом физики атмосферы Академии наук (В.И. Дианов-Клоков, И.П. Малков). В состав ПСК входили система слежения за Солнцем, спектрометр с дифракционной решеткой и компьютер с программным обеспечением для управления комплексом и обработки результатов измерений [5]. (Репринт статьи с описанием полевого спектрального комплекса приведен в настоящем сборнике на с. 286–291.) Большое внимание было уделено калибровке и поверке ПСК, которые проводились с использованием расчетов спектров поглощения методом line by line, многоходовой оптической кюветы и самолетного зондирования [8]. Это обеспечило достоверность получаемых данных об интегральном содержании изучаемых газов в толще атмосферы.

Существенным достижением коллектива, работавшего в этом направлении, явилось доведение технологии до практического применения, позволившее организовать мониторинг парниковых газов сначала на берегу озера Иссык-Куль (Киргизия), а затем в Обнинске и в Антарктиде (на станции «Новолазаревская»). Мониторинг интегрального содержания парниковых газов методом молекулярной солнечно-абсорбционной

спектроскопии развивался в ИЭМ как альтернатива методу с использованием газоанализаторов с эталонными газовыми смесями, применяемому на станциях глобальной сети мониторинга атмосферы Всемирной метеорологической организации (ВМО). Уступая последнему по точности, он для континентальных условий оказывается более эффективным, поскольку для этого метода влияние приземных источников и стоков незначительно.

Важно подчеркнуть, что именно в ИЭМ метод молекулярной солнечно-абсорбционной спектроскопии, который сейчас широко используется в мире на сети станций NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change) и TCCON (Total Carbon Column Observation Network), начал впервые применяться для систематического контроля содержания парниковых газов в толще атмосферы. ПСК в различных вариантах эксплуатировался в разных условиях и разных странах, в частности в экспедиционных условиях в Болгарии и на Кубе, и неизменно демонстрировал высокую надежность. Он до сих пор работает в Антарктиде на станции «Новолазаревская».

С помощью ПСК получен ряд важных результатов о долговременной изменчивости парниковых газов в различных географических зонах. Прежде всего это относится к одному из самых длительных рядов наблюдений интегрального содержания парниковых газов в континентальных условиях на станции «Иссык-Куль» (с 1980 г. по настоящее время) [21]. Эти наблюдения позволили выявить важные характеристики изменчивости парниковых газов – тренды, межгодовые и сезонные вариации, гармонические колебания различной периодичности, сопоставить их с вариациями



Павильон (слева) с размещенным в нем ПСК (справа) на станции «Новолазаревская» в Антарктиде, 2016 год

других атмосферных характеристик и глобальных атмосферных явлений и построить статистическую модель временной изменчивости парниковых газов в континентальных условиях [9, 20].

Измерения в Антарктиде, а также на кораблях во время переходов из Санкт-Петербурга в Антарктиду и обратно, проводившиеся Ф.В. Кашиным, А.В. Кальсиным, В.П. Устиновым и др., дали обширную и чрезвычайно ценную информацию о вариациях парниковых газов в антарктической атмосфере и над Атлантикой [10, 22].

Начиная с 1998 года в Обнинске наряду с измерениями интегрального содержания парниковых газов Ф.В. Кашиным, В.П. Устиновым и другими были организованы измерения их концентрации тем же методом молекулярной абсорбционной спектроскопии в пробах воздуха, отбираемых в приземном слое и на трех уровнях Высотной метеорологической мачты [11]. Это дало возможность получать регулярную информацию о вертикальных профилях концентрации парниковых газов в пограничном слое атмосферы при различных метеоусловиях. На протяжении нескольких лет результаты этих измерений сопоставлялись с данными измерений состава воздуха в одних и тех же пробах, выполняемых независимо в NOAA ESRL (The NOAA Earth System Research Laboratory, USA, <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/>) и показали хорошее согласие.

Результаты измерений содержания парниковых газов в приземном воздухе и во всей толще атмосферы, проводимых в Обнинске, и оценка их изменчивости размещаются в Ежегодных докладах Росгидромета об особенностях климата на территории РФ.

Новым этапом развития этих работ явилась разработка, начиная с 2008 года, аппаратного комплекса нового поколения на базе отечественного ИК-Фурье спектрометра ФСМ 1201, многоходовой кюветы с длиной трассы до 40 м и современной солнцеследящей системы с цифровым управлением. Такой комплекс, получивший название МР-32, позволяет проводить измерения одним и тем же методом как интегрального содержания парниковых газов в толще атмосферы по солнцу как источнику излучения, так и в приземном слое воздуха при любых погодных условиях без предварительного отбора проб. Это существенно расширяет возможности мониторинга парниковых газов. Комплекс создан и размещен на пяти станциях на территории Российской Федерации в различных географических зонах.

Стратосферный аэрозоль и озон

Работы по исследованию влияния на климат стратосферного аэрозоля и озона под руководством С.С. Хмелевцова широко развернулись в ИЭМ, начиная с 1978 года, когда был образован отдел физики климата. Они включали в себя как экспериментальную часть (лидарное зондирование атмосферы), так и теоретические исследования. Уже в 1985 году была создана Обнинская лидарная станция для проведения систематических измерений атмосферного аэрозоля и озона. В состав станции входили как стационарные лидары, так и мобильный лидарный комплекс «Макет-2». Одной из главных задач лидарной станции являлось проведение одновременных измерений аэрозоля и озона в стратосфере [32]. (Репринт фрагментов статьи о лазерном зондировании атмосферных параметров на Обнинской лидарной станции приведен в настоящем сборнике на с. 292–304.)

Для получения более полной информации была создана небольшая сеть лидарных станций, предназначенных для зондирования атмосферного (главным образом стратосферного) аэрозоля. Они были размещены как на территории СССР, так и за рубежом – в Республике Куба. Первые измерения на Минской



*Доктор физ.-мат. наук, профессор С.С. Хмелевцов (крайний справа)
с сотрудниками лаборатории, 2000 год*

лидарной станции были проведены в 1987 г., а в 1988 г. – на станциях, расположенных в пос. Теплоключенка (Кыргызстан) и г. Камагуэй (Куба). Лидарная станция на Кубе, несмотря на практически полное прекращение научно-технического сотрудничества в области гидрометеорологии в 1991 г., успешно продолжала работать до 2010 года. На всей сети были внедрены единые методики измерений, обработки и архивации данных. К сожалению, после распада СССР измерения со станций, расположенных за пределами Российской Федерации, перестали поступать в НПО «Тайфун».

На обнинской лидарной станции за период измерений с 1985 по 1996 г. были получены многолетние ряды характеристик обратного рассеяния и оптической толщи стратосферного аэрозоля. Данные измерений позволили оценить влияние крупных вулканических извержений на стратосферный аэрозоль. Так, наиболее сильное воздействие на слой стратосферного аэрозоля, которое оказало извержение вулкана Пинатубо (июнь 1991 г.), наблюдалось, начиная с момента его извержения и до конца 1994 года. При этом максимальные значения общего содержания аэрозоля в слое приблизительно 15–30 км, определяемые по интегралу обратного рассеяния, достигали в начале 1992 г. на всех лидарных станциях упомянутой сети [32].

Результаты измерений стратосферного аэрозоля в 1988–1990 гг. в Обнинске и Минске, в периоды, когда не было крупных извержений, и сравнение их с данными измерений на европейских лидарных станциях в 1978 г. позволили сделать вывод о росте фонового содержания стратосферного аэрозоля на 5–7 % в год, что, помимо климатического эффекта (понижение приземной температуры), может привести к уменьшению концентрации озона в стратосфере [24].

Измерения, проведенные над Обнинском и Минском в ночь с 31 января на 1 февраля 1989 г., зарегистрировали редкое явление – образование облаков в стратосфере средних широт на высоте 20–25 км [34]. Присутствие стратосферных облаков в средних широтах было подтверждено позже при измерениях в Обнинске с помощью аппаратуры нового поколения [27]. Серия измерений озона на двух длинах волн в условиях повышенного содержания аэрозоля в нижней стратосфере позволила выявить существенную зависимость озонового слоя от плотности стратосферного аэрозоля [31].

Следует подчеркнуть, что лидарная станция НПО «Тайфун» была единственной на Европейской территории России, которая позволяла контролировать эту часть озонного слоя с удовлетворительной точностью и пространственно-временным разрешением.

Подробное описание результатов исследований стратосферного аэрозоля, стратосферного озона и тропосферного аэрозоля, проводившихся методом лидарного зондирования на Обнинской лидарной станции, приведено в [32].

Новый этап развития работ по лазерному зондированию атмосферы начался в 2008 г. с разработки под руководством В.А. Коршунова двухдлинноволнового лидара АК-3, с помощью которого измеряются параметры аэрозоля на высотах 10–50 км, концентрация атмосферного озона на высотах 15–35 км и вертикальный профиль температуры на высотах 30–70 км. Семь таких лидарных комплексов для мониторинга состояния атмосферы размещены на территории Российской Федерации в различных географических зонах. С помощью лидара АК-3 уже получен ряд интересных научных результатов по наблюдениям стратосферных аэрозольных следов от челябинского метеорита, внезапным стратосферным потеплениям, характеристикам стратосферного аэрозоля и др. [18, 27, 28].

Теоретические работы, выполненные в НПО «Тайфун» в 1980–1990-е гг. М.П. Коломеевым и др. по климатической проблеме, затрагивали ряд важных вопросов физики климата. Была разработана энергобалансовая модель климата [16], на основе которой проведено исследование влияния стратосферного аэрозоля на характеристики земной климатической системы [23], оценено влияние тропосферного аэрозоля на климат и параметры общей циркуляции атмосферы [26], рассмотрена динамика характеристик арктического морского льда в связи с климатическими изменениями [25].

Проблема влияния вулканических извержений и стратосферного аэрозоля на климат Земли была детально рассмотрена в книге [17], подготовленной большим коллективом авторов под научной редакцией С.С. Хмелевцова. К сожалению, направление по теоретическому моделированию влияния различных факторов на климат Земли в силу разных причин не получило дальнейшего развития в нашем объединении.

В последние годы в НПО «Тайфун» в кооперации с другими организациями проводятся лабораторные и натурные

исследования по одному из широко обсуждаемых в научной литературе направлению – геоинженерингу климата, а именно возможности целенаправленного влияния на состояние глобального климата для его стабилизации в условиях антропогенного воздействия на климатическую систему [19].

Мониторинг атмосферного озона

В 80-е годы прошлого века под руководством В.Н. Лебединца в ИЭМ развернулись масштабные работы по контролю озонового слоя Земли и ультрафиолетовой (УФ) радиации. Надо сказать, что проблема озонового слоя в это время стала широко обсуждаться мировым научным сообществом. Причиной этому послужили экспериментальные факты катастрофического весеннего уменьшения озона над Антарктидой и участвовавшие случаи фиксации так называемых озоновых «мини-дыр» в Северном полушарии. В 1985 году международным сообществом была принята Венская конвенция по охране озонового слоя. Стратосферный озон, как известно, не только влияет на климат Земли, но и служит щитом, защищающим биосферу от губительного коротковолнового ультрафиолетового излучения солнца.

Для контроля озоносферы из космоса в сжатые сроки в кооперации с рядом организаций СССР в ИЭМ были разработаны и изготовлены два бортовых ультрафиолетовых спектрометра, реализующие метод обратного рассеяния: БУФС-1 – для измерения яркости подстилающей поверхности в УФ-диапазоне спектра и БУФС-2 – для измерения поля общего содержания озона (СОО) и вертикального распределения его концентрации (ВРО).

БУФС-1 был установлен на метеорологическом спутнике № 3 серии «Метеор» и успешно проработал на нем около полутора лет – с октября 1985 года по февраль 1987 года. БУФС-2 с осени 1991 до осени 1992 г. успешно функционировал на борту ИСЗ «Метеор-3» № 5 [3, 13, 33]. После пионерских работ по практической реализации метода обратного рассеяния для исследования озоносферы, выполненных советскими учеными в середине 1960-х годов на спутнике «Космос-121», это были первые отечественные приборы для контроля озонового слоя, установленные на спутниках. Следует отметить большую роль в постановке и развитии этих работ и вообще исследований озонового слоя Земли в НПО «Тайфун» Олега Александровича



Доктор физ.-мат. наук, профессор В.Н. Лебединец (третий слева в верхнем ряду) с сотрудниками своей лаборатории, 1981 год

Волковицкого, в то время заместителя директора ИЭМ по научной работе.

Несмотря на то, что приборы БУФС-1 и БУФС-2 проработали сравнительно недолгое время, с их помощью был решен ряд важных задач. Опробованы методики обработки получаемой с приборов информации, позволяющие корректно определять ОСО и ВРО. Выявлено не замеченное ранее увеличение ОСО на границах антарктической озоновой «дыры» и «мини-дыры» в Северном полушарии, прослежена существенная деформация ВРО при вторжении тропической воздушной массы в умеренные широты [13]. Большую роль в получении данных измерений, их обработки и интерпретации играли Н.В. Терев и А.В. Кальсин.

Накопленный уникальный опыт при разработке и эксплуатации этих приборов позволил НПО «Тайфун» самостоятельно разработать картографирующий озонметр БУФС-4 для метеорологических ИСЗ нового поколения [15]. Этот прибор должен был стать существенным элементом отечественной космической системы мониторинга атмосферы. Однако с распадом СССР работы по этому направлению в НПО «Тайфун», к сожалению, прекратились.

Вместе с разработкой аппаратуры для космического мониторинга озонового слоя в НПО «Тайфун» были развернуты работы по контролю озонового слоя наземными средствами. С этой целью был введен в эксплуатацию высокоточный прибор – спектрофотометр Брюера № 044. С 1994 г. станция «Обнинск» под номером 307 входит в мировую озонометрическую сеть. Результаты измерений спектрофотометра Брюера № 044 регулярно направляются в Канаду в международный центр данных по озону и УФ-радиации – WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Data Centre). Для использования в экспедиционных условиях была разработана серия малогабаритных приборов для контроля приходящей УФ-радиации.

Во время комплексных экспедиционных исследований на Кубе в 1980-х годах вместе с ГГО им. А.И. Воейкова выполнялись измерения общего содержания и вертикального распределения озона совместно с измерениями интегрального содержания водяного пара. Были выявлены общие черты межсуточных и внутрисуточных вариаций этих малых газовых составляющих при различных синоптических условиях, в том числе при тропическом циклогенезе. Полученные в экспедициях результаты явились одной из основ для разработки гипотезы об озоне как индикаторе тропического циклогенеза [29].

Наряду с разработкой и эксплуатацией аппаратуры для мониторинга озона в НПО «Тайфун» развивались теоретические исследования по влиянию на озоновый слой Земли различных природных процессов и антропогенных факторов. Э.Л. Александровым и Ю.С. Седуновым выпущена монография, в которой проанализированы теории разрушения озона под действием антропогенных факторов (полеты стратосферной авиации, рост использования азотных удобрений, фреонов и других хлорорганических соединений), а также ядерных взрывов в атмосфере. Рассмотрены возможные последствия влияния уменьшения содержания озона в стратосфере на биосферу и человека и международные действия, направленные на предотвращение разрушения стратосферного озона [1].

В соавторстве с учеными других организаций Э.Л. Александровым подготовлена монография, посвященная всестороннему рассмотрению проблемы озонового щита Земли и его изменениям [2]. В 1980–1990-е годы в научной литературе развернулась широкая дискуссия о причинах и механизмах весенней деградации озона над Антарктидой. Одной из главных была гипотеза об

антропогенной деятельности, приводящей к насыщению атмосферы свободными атомами хлора и брома, разрушающими озон. Ученые НПО «Тайфун» выполнили ряд работ, посвященных критическому анализу гипотез о доминирующем влиянии антропогенных факторов на уменьшение общего содержания озона [14].

Значительное внимание уделялось рассмотрению роли динамических факторов в изменчивости озонового слоя. А.Ф. Нерушевым проведено детальное исследование воздействия интенсивных атмосферных вихрей – циклонов тропических и умеренных широт – и центров действия атмосферы на озоновый слой. Сформулирована концептуальная модель воздействия тропического циклона на озоновый слой. Проанализированы коллективные эффекты возмущающего влияния внетропических и тропических циклонов на региональную изменчивость озонового слоя в умеренных, субтропических и тропических широтах. Получены количественные характеристики связи межгодовых вариаций параметров центров действия атмосферы и изменчивости поля общего содержания озона. Результаты исследований обобщены в монографии [29].

Ряд этих исследований продолжается и развивается в настоящее время. В частности, изучается связь вариаций общего содержания озона с различными гелио-геофизическими факторами [12]. С помощью современной аппаратуры (спектрофотометр Брюера, хемилюминесцентный анализатор) в Обнинске продолжается мониторинг общего содержания озона и УФ-радиации, проводится регулярный контроль приземной концентрации озона и исследования ее связи с метеопараметрами и атмосферными явлениями [30], что является важным элементом построения прогностической модели максимальных значений приземного озона и УФ-облученности земной поверхности.

Список литературы

1. Александров Э.Л., Седунов Ю.С. Человек и стратосферный озон. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. 104 с.
2. Александров Э.Л., Израэль Ю. А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х. Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 288 с.
3. Андриенко Д.А., Барышева В.И., Ващенко В.Н. и др. Бортовой ультрафиолетовый спектрометр БУФС-1 // Исследование Земли из космоса. 1990. № 1. С. 67–73.

4. Арефьев В.Н., Боровский Н.В., Волковицкий О.А. и др. Оптическая многоходовая ювета с базой 50 м для исследования спектров пропускания газов // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 5(43). С. 156–164. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 277–285.)
5. Арефьев В.Н., Дианов-Клоков В.И., Малков И.П. Полевой спектральный комплекс для исследований содержания в атмосфере загрязняющих газов // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 8(81). С. 73–78. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 286–291.)
6. Арефьев В.Н., Сизов Н.И. Лабораторные исследования ослабления излучения в окне относительной прозрачности атмосферы 8–13 мкм // Проблемы метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1979. С. 78–85.
7. Арефьев В.Н. Ослабление излучения в окне относительной прозрачности атмосферы 8–13 мкм (аналитический обзор) // Метеорология и гидрология. 1980. № 1. С. 97–112.
8. Арефьев В.Н., Вишератин К.Н., Кашин Ф.В., Устинов В.П. Аппаратура для измерений спектроскопическим методом интегрального содержания газов в атмосфере // Труды ИЭМ. 1995. Вып. 25(160). С. 119–125.
9. Арефьев В.Н., Кашин Ф.В., Семенов В.К. Результаты экспериментальных исследований радиационно-активных составляющих атмосферы в центре Евразии // Глобальные изменения климата и их последствия для России. Ред. Г.С. Голицын, Ю.А. Израэль. М.: Изд-во Регион. общ. организ. ученых по проблемам приклад. геоф., 2002. С. 212–222.
10. Арефьев В.Н., Кальсин А.В., Каменоградский Н.Е., Кашин Ф.В., Парамонова Н.Н., Устинов В.П. Измерения содержания парниковых газов в атмосфере над Атлантикой и Антарктидой // Метеорология и гидрология. 2003. № 11. С. 37–43.
11. Арефьев В.Н., Акименко Р.М., Кашин Ф.В., Упэнэк Л.Б. Фоновая составляющая концентрации метана в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // Изв. РАН. ФАО. 2016. Т. 52. № 1. С. 42–50.
12. Вишератин К.Н. Квазидесятилетние вариации общего содержания озона, ветра, температуры и геопотенциальной высоты над станцией «Ароза» // Изв. РАН. ФАО. 2016. Т. 52, №1. С. 74–82.
13. Волковицкий О.А., Кальсин А.В., Козина Т.В., Мильченко В.Т., Терреб Н.В., Троянова Н.М. Измерения общего содержания и высотного распределения концентрации озона с космического аппарата «Метеор-3» // Изв. АН. ФАО. 1993. Т. 29, № 5. С. 646–652.
14. Волковицкий О.А., Гаврилов А.А., Кайдалов О.В. Критический анализ гипотез о доминирующем влиянии антропогенных факторов на формирование аномальных и длиннопериодных трендов общего содержания атмосферного озона // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 38–55.
15. Волковицкий О.А., Терреб Н.В., Мильченко В.Т., Птахин В.И., Коломиец Г.А., Кашин Ф.В. Картографирующий озонметр БУВС-4 для ИСЗ «Метеор» нового поколения // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 56–76.
16. Воловиков С.А., Коломеев М.П. Сезонная энергобалансовая модель климата // Труды ИЭМ. 1985. Вып. 35 (113). С. 3–15.
17. Вулканы, стратосферный аэрозоль и климат Земли. Под ред. С.С. Хмелевцова. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 256 с.
18. Иванов В.Н., Зубачев Д.С., Коршунов В.А. и др. Лидарные наблюдения стратосферных аэрозольных следов от челябинского метеорита // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 02. С. 117–122.

19. Израэль Ю.А., Захаров В.М., Петров Н.Н., Рябошапка А.Г., Иванов В.Н., Савченко А.В., Андреев Ю.В., Ераньков В.Г., Пузов Ю.А., Данилян Б.Г., Куляпин В.П., Гулевский В.А. Натурные исследования геоинженерного метода сохранения климата с использованием аэрозольных частиц // *Метеорология и гидрология*. 2009. №10. С. 5–10.

20. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Вишератин К.Н., Каменогградский Н.Е., Семенов В.К., Синяков В.П. Результаты экспериментальных исследований радиационно-активных составляющих атмосферы в центре Евразии // *Изв. АН. ФАО*. 2000. Т. 36, № 4. С. 463–492.

21. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Каменогградский Н.Е., Семенов В.К., Синяков В.П. Содержание углекислого газа в толще атмосферы центральной части Евразии (станция мониторинга «Иссык-Куль») // *Изв. РАН. ФАО*. 2007. Т. 43, № 4. С. 86–95.

22. Кашин Ф.В., Радионов В.Ф., Гречко Е.И. Вариации общего содержания окиси углерода и метана в антарктической атмосфере // *Изв. РАН. ФАО*. 2007. Т. 43, № 4. С. 96–102.

23. Кауфман Ю.Г., Коломеев М.П., Хмелевцов С.С. Моделирование влияния стратосферного аэрозоля на климат // *Метеорология и гидрология*. 1983. № 6. С. 5–12.

24. Климатический лидарный мониторинг стратосферного аэрозольного слоя. В.М. Захаров, С.С. Хмелевцов, Ю.Г. Кауфман и др. // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 11. С. 30–35.

25. Коломеев М.П., Малышев С.Л., Никонов С.А. Динамика арктического льда в сезонной энергобалансовой модели климата с региональным разрешением // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 8. С. 30–36.

26. Коломеев М.П., Сороковикова О.С. Влияние тропосферного аэрозоля на среднесезонные параметры общей циркуляции атмосферы // *Изв. АН СССР. ФАО*. 1991. Т. 27, № 5. С. 483–491.

27. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Характеристики стратосферного аэрозоля по данным лидарных измерений над г. Обнинском в 2012–2015 гг. // *Оптика атмосферы и океана*. 2016. Т. 29. № 12. С. 1034–1042.

28. Коршунов В.А., Зубачев Д.С. Лидарные исследования температурных возмущений средней атмосферы над г. Обнинском в 2012–2015 гг. // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 1. С. 110–122.

29. Нерушев А.Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой Земли. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. 223 с.

30. Тереб Н.В., Милехин Л.И., Милехин В.Л. Результаты шестилетних регулярных измерений приземного озона в г. Обнинске // *Сб. статей*. Т. 1. Под ред. А.Ф. Нерушева. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2010. С. 138–149.

31. Хмелевцов С. С., Светогоров Е. Д. Двухчастотное лазерное зондирование стратосферного озона // *Изв. АН СССР. ФАО*. 1995. Т. 31, № 1. С. 77–80.

32. Хмелевцов С.С., Кауфман Ю.Г., Коршунов В.А., Светогоров Е.Д., Хмелевцов А.С. Лазерное зондирование атмосферных параметров на Обнинской лидарной станции НПО «Тайфун» // *Вопросы физики атмосферы*. СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 358–392. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 292–304.)

33. Kalsin A.V., Lebedinets V.N., Tereb N.V. et al. Satellite spectrometer BUFS-2 for ozone measurements by back-scattering // *Adv. Space Res.* 1993. Vol. 13, N 1. P. 329–330.

34. Measurements of stratospheric clouds characteristics in the moderate latitudes. S.S. Khmelevtsov, M.P. McCormick, Yu.G. Kaufman et al. Fifteenth International Laser Radar Conference. Abstracts of papers. Part 1. Tomsk, USSR, 1990. P. 159–162.



ТРОПИЧЕСКАЯ МЕТЕОРОЛОГИЯ И ОПАСНЫЕ АТМОСФЕРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Л.Х. Ингель

Изучение опасных атмосферных явлений в НПО «Тайфун» (первоначально ИЭМ) исторически началось с тропических циклонов (ураганов, тайфунов).

В начале 70-х годов Всемирная метеорологическая организация активизировала исследования тропической зоны, готовилась комплексная экспедиция беспрецедентных масштабов – Атлантический тропический эксперимент (АТЭП). Это был первый научный проект обширной Программы исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП), рассчитанной



М.А. Петросянц (1919–2005 гг.)

на десятилетия. В СССР было принято решение об активном участии в этих международных проектах и дальнейшем масштабном развитии исследований тропической зоны. В качестве координирующей организации был избран Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ). Важную роль здесь сыграли авторитет и энтузиазм тогдашнего директора ИЭМ профессора Михаила Арамаисовича Петросянца – известного исследователя тропической зоны.

Для развертывания и координации этих работ в институте было создано специальное подразделение – сначала лаборатория, а затем отдел № 9. Отдел возглавил и почти два десятилетия руководил им профессор Владислав Николаевич Иванов (1928–2005 гг.).

Под его энергичным руководством подразделение быстро выросло количественно и качественно. Численность отдела в 80-е годы приближалась к шести десяткам сотрудников, причем в большинстве это были хорошо отобранные, квалифицированные специалисты. Затем отделом руководили П.Н. Свиркунов и В.П. Кармазин. Среди авторов важнейших результатов – В.Е. Захаров [2], С.Л. Лебедев [9], А.Ф. Нерушев [10, 11], В.Д. Пудов, С.А. Петриченко, М.И. Ярошевич, Л.И. Петрова [9], В.В. Ипатов, Б.Я. Шмерлин, М.В. Калашник, Т.Ф. Масагутов, Ю.Т. Сапронов и др.

С середины 70-х годов наибольшее внимание в работе уделяется тропическим циклонам (ТЦ), которые относятся к наиболее опасным атмосферным явлениям. Отдел в течение многих лет координировал работы по большой программе, в которой участвовали многие институты и ведомства (подготовка и проведение экспедиций, анализ натурных данных, численное и лабораторное моделирование, организация международного сотрудничества, теоретические исследования, поиски путей воздействия на



Одна из последних фотографий В.Н. Иванова с группой сотрудников отдела тропической метеорологии. Слева направо: В.Н. Иванов, Л.И. Петрова, В.В. Ипатов, Ю.Т. Сапронов (сидит), В.Д. Пудов (стоит), В.Н. Яхрюшин, Л.Х. Ингель, С.А. Петриченко

тропические циклоны, разработка средств измерений и др.). Среди организаций-соисполнителей были Гидрометцентр СССР, ЦАО, ИПГ, ГГО, ДВНИГМИ, физфак и Институт механики МГУ, НИРФИ и др., а среди активно сотрудничавших с ИЭМ специалистов из этих институтов можно упомянуть А.Е. Ордановича, А.П. Хаина, А.И. Фальковича, Р.С. Бортковского, А.А. Сперанскую, Е.П. Анисимову, И.Д. Гиниса, Н.И. Вульфсона, Л.М. Левина, Н.И. Павлова, В.П. Тунеголовца, И.В. Некрасова, И.Г. Ситникова, М.А. Сорочинского, Г.П. Берюлева и многих других.

В настоящем обзоре вкратце перечислены основные события, относящиеся к истории этого направления работы, важнейшие результаты разных лет. Ниже содержится большой список экспедиций. Некоторые из них были уникальными, беспрецедентными по масштабам, продолжительности, экзотическим регионам их проведения, научным результатам. Американцы, которым ураганы ежегодно приносят многомиллиардные убытки, не находят средств на такие экспедиции для исследования этих явлений, а в СССР – нашлись. Соответственно, и научные результаты в ряде случаев были получены уникальные. Например, Владимир Дмитриевич Пудов (фактически идеолог океанологических исследований) однажды на свой страх и риск настоял на



Шутливое поздравление 8 марта (в центре – В.Н. Иванов)



... и ответная акция женщин отдела

том, чтобы сразу несколько судов двинулись по следу тайфуна, только что прошедшего в тысяче миль от экспедиции. Такое масштабное, затратное отклонение от плана экспедиции в случае неудачи, конечно, было чревато серьезными последствиями. Но результаты превзошли все ожидания – впервые был подробно исследован хорошо выраженный, масштабный и продолжительно существующий след тайфуна в океане. Это было, что называется, новое слово в мировой науке; результат, важный и для практики, поскольку этот след в течение долгого времени влияет на погоду в регионе.

В экспедициях и работе совместных международных лабораторий на Кубе и во Вьетнаме участвовали десятки сотрудников НПО «Тайфун». Их образ жизни заметно отличался от обычной размеренной жизни обнинских научных работников. Прежде всего требовалась огромная, напряженная работа по технической подготовке каждой экспедиции. Кроме того, оформление выезда за границу (да еще с заходами в сомнительные тропические страны) в советское время было сопряжено с преодолением очень серьезных бюрократических проблем (вот лишь один мелкий пример: документы для выезда одного завлаба однажды вернулись с формулировкой: «Не указаны причины развода с первой женой»). В экспедициях иногда возникали форс-мажорные ситуации, когда приходилось напряженно работать, не вспоминая о нормированном рабочем дне. Тот же В.Д. Пудов в своих воспоминаниях рассказывает, например, о случае, когда из-за неудачного маневра судна перевернулся буй, оборудованный чувствительными приборами для важных измерений вблизи границы раздела вода–воздух. «...Все платы и датчики выгорели. Аккумулятор плюс морская вода!... Нужно было восстановить буй. Сережа, Саша и я, как каторжники, сутками сидели в этой замкнутой «без окон и дверей» лаборатории и практически заново паяли платы и другие устройства... В течение недели, может быть чуть больше, восстановили наш основной инструмент исследований». Продолжительность некоторых экспедиций приближалась к четырем месяцам. Не все хорошо переносят сильную качку (если говорить коротко)... За посещение экзотических регионов в жаркое время сезона тайфунов приходилось потом расплачиваться нелегкой акклиматизацией при возвращении домой в холодный уже сезон. Для здоровья это бывало очень небезобидно.

Некоторые важнейшие события

Важнейшие морские экспедиции

1972 г. «ТРОПЭКС-72». Междуведомственная геофизическая экспедиция (5 судов) по программе национального Атлантического тропического эксперимента.

1974 г. «ТРОПЭКС-74». Междуведомственная геофизическая экспедиция (5 судов) – национальный вклад СССР в Международный Атлантический тропический эксперимент.

1975 г. – «Тайфун-75» – первая комплексная экспедиция (5 судов) в район генезиса ТЦ.

1977 г. – «Муссон-77», 5 судов, исследование тропической циркуляции.

1977 г. – прикладные работы в Атлантике по исследованию влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на энергообмен.

1978 г. – «Тайфун-78» – вторая комплексная экспедиция (5 судов) в район зарождения ТЦ.

1979 г. – Первая Советско-Кубинская морская экспедиция.

1981 г. – «Тайфун-81», 2 фазы: 1) Атлантическая, работа в Карибском море, 1 судно; 2) Тихоокеанская – 1-я Советско-Вьетнамская экспедиция, работа в «гнезде» тайфунов, 4 судна.

1983 г. – 2-я Советско-Вьетнамская экспедиция, 2 судна.

1987 г. – 4-я Советско-Вьетнамская экспедиция, 2 судна.

1988 г. – 5-я Советско-Вьетнамская экспедиция, 2 судна.

1989 г. – Экспедиция по программам «Тайфун» и «Разрезы», 2 судна.

1990 г. – Комплексная экспедиция «Тайфун-90», 5 судов.

Международное сотрудничество

Совместная Советско-Кубинская лаборатория, организована в 1977 году.

Совместная Советско-Вьетнамская лаборатория, организована в 1980 году.

Совместные самолетные экспедиции: Вьетнам – 1984, 1988 гг.; Куба – 1988 г.

Комплексные наземные экспедиции на Кубе 1984, 1987 гг.

Организация международных симпозиумов по тропической метеорологии: Нальчик, 1981; Гавана, 1982; Ялта, 1985; Гавана, 1987; Обнинск, 1991.

Издательская деятельность

Помимо многих десятков научных статей, опубликованы большие сборники трудов экспедиций, международных симпозиумов, тематические выпуски Трудов ИЭМ «Тропическая метеорология» и две монографии. Формат настоящего сборника не позволяет привести сколько-нибудь полный список даже основных работ. Поэтому в списке литературы содержатся лишь некоторые важнейшие публикации. Репринты начальных фрагментов двух публикаций о задачах и итогах крупных экспедиций (М.А. Петросянц [26], В.Н. Иванов [15]) воспроизведены ниже. (Репринты работ приведены на с. 305–314 и с. 315–323 соответственно). Более подробную библиографию за период до 2010 г. можно найти в [4], см. также [3, 5, 17–25, 32].

Некоторые важнейшие научные результаты

Основные результаты исследований на конец 80-х годов подробно изложены в [1]. В настоящем разделе коротко перечислены некоторые важнейшие результаты, относящиеся к тропическим циклонам.

Впервые в мире была детально исследована реакция верхнего слоя океана на воздействие тропических циклонов – термический, халинный и динамический отклик (В.Д. Пудов, В.Н. Иванов, С.А. Петриченко и др. [1, 4, 15, 16]).

Было установлено:

- глубина реакции океана на воздействие ТЦ может достигать 800 и более метров;
- время «жизни» термических аномалий, вызванных воздействием ТЦ, может достигать нескольких месяцев;
- под воздействием ТЦ в океане может сформироваться вихрь синоптического масштаба; это один из источников синоптических вихрей в открытом океане, возможность существования которого ранее не признавалась.

На основе детального анализа динамических характеристик тропосферы на ближней и дальней периферии тропических циклонов показано, что горизонтальная конвергенция массы в ТЦ не сосредоточена в пограничном слое, как считалось ранее, а может захватывать толстый слой от поверхности до уровней порядка 300 гПа. Результаты балансных исследований по экспедиционным данным подтвердили, что главным

источником энергии для тропического циклона является водяной пар, поступающий с периферии в активную зону. Боковые притоки кинетической энергии пренебрежимо малы, т.е. тропический циклон не зависит от внешнего источника кинетической энергии: механическая энергия в основном производится в нем самом в процессе его жизненного цикла (Л.И. Петрова, В.Н. Иванов [1, 4]).

Экспедиционные исследования показали, что в тропической зоне океана при слабых и умеренных ветрах существует инверсия температуры воздуха на высотах от 0,5 до 3,0 метров. Были детально исследованы мощность инверсионного слоя и его пространственно-временная изменчивость. Обнаружен нестационарный (импульсный) характер обмена теплом и влагой с атмосферой, так называемые «взрывы турбулентности». Это, видимо, связано с существованием упомянутой инверсии (В.Д. Пудов, С.А. Петриченко и др. [1, 4]).

Разработана гидромеханическая модель перемещения тропических циклонов (Б.Я. Шмерлин [4, 28]).

Разработана и продолжает совершенствоваться теоретическая модель влажно-конвективной неустойчивости в атмосфере над океаном. Модель описывает зарождение ураганоподобного вихря в процессе развития конвективной неустойчивости (Б.Я. Шмерлин, М.В. Калашник [4, 29]).

Экспериментально исследовано влияние поверхностно-активных веществ на энергообмен между атмосферой и океаном (В.Д. Пудов, С.А. Петриченко и др. [1, 4]).

Экспериментально исследована роль брызг в энергообмене океана и атмосферы в тайфунах и штормах. Впервые установлен рост перепада температур вода–воздух в приводном слое при ветрах более 20 м/с, обусловленный генерацией и испарением брызг. Разработан первый вариант параметризации приводной температуры в штормовых условиях, учитывающей эффект брызг (В.Д. Пудов, С.А. Петриченко и др. [1, 4]).

На основе детального анализа спутниковых и наземных измерений установлено, что возмущения озонового слоя Земли, генерируемые развивающимся тропическим циклоном, содержат важную информацию о параметрах ТЦ и процессах, управляющих его развитием. Выявлены количественные зависимости характеристик возмущений озонового слоя от энергетических параметров ТЦ. Эти возмущения доступны регистрации с помощью существующих средств дистанционного зондирования и могут

рассматриваться как диагностические и прогностические признаки развития ТЦ (А.Ф. Нерушев [1]).

Разработан приближенный метод определения параметров центральной зоны ТЦ (эффективных размеров области ураганных ветров, глаза урагана, облачной стены глаза, максимальной скорости ветра) и средних характеристик поля скорости приводного ветра на основе данных микроволнового зондирования системы океан–атмосфера из космоса (А.Ф. Нерушев и др. [10, 11]).

Разработана энергобалансовая модель тропического циклона (М.В. Калашник [4, 7]). Анализ натурных данных показал, что модель удовлетворительно описывает наблюдаемые радиальные профили скорости ветра (М.В. Калашник, Л.И. Петрова [4, 7]).

Разработаны количественные критерии активности проявлений тропических циклонов («циклонической активности»). На основе этих критериев выполнен цикл исследований статистических закономерностей активности проявлений ТЦ. Найдены закономерности, имеющие прогностическое значение (М.И. Ярошевич [4, 30]).

Анализ данных, относящихся к условиям зарождения ТЦ, показал, что обычно используемые интегральные критерии конвективной неустойчивости тропосферы слишком грубы. Показано, что зарождение ТЦ может существенно зависеть от тонких особенностей вертикальных профилей гидростатической устойчивости, таких как наличие или отсутствие задерживающих слоев (С.Л. Лебедев, Л.И. Петрова [4, 9]).

Разработана численная модель ячейковой конвекции на фоне дивергентного потока над тропическим океаном (А.П. Хаин, Л.Х. Ингель [1]).

Установлены статистические взаимосвязи между тропическим циклогенезом и явлением Эль-Ниньо, которые могут быть использованы для прогнозирования зарождения и перемещения ТЦ (В.Д. Пудов, С.А. Петриченко [4]).

На основе анализа натурных данных показано, что в не штормовых условиях в тропической зоне океана, в отличие от внетропической зоны, всегда существует устойчивая стратификация нижнего 100-метрового слоя воздуха в дневное время (С.А. Петриченко, В.Д. Пудов [1, 4]).

Разработана теоретическая модель пограничного слоя атмосферы в ТЦ. Предложен ряд подходов к активным воздействиям на ТЦ (Л.Х. Ингель [4, 31]).

На основе анализа натурных данных открыт прибрежный апвеллинг у берегов Южного Вьетнама, который является

своеобразной защитой г. Хошимина (Сайгона) от разрушительного воздействия тайфунов (В.Д. Пудов, С.А. Петриченко [4]).

Построена теоретическая модель интенсификации тропических циклонов под влиянием радиального притока углового момента ветра (М.В. Калашник [8]).

Обнаружены не известные ранее закономерности сейсмических проявлений тропических циклонов и некоторых других интенсивных атмосферных явлений (М.И. Ярошевич, Л.Х. Ингель [4, 6]). За эти исследования сотрудникам ИЭМ присуждена региональная научная премия им. А.Л. Чижевского (2008 г.).

Основные направления текущей работы

В прошлом в течение ряда лет одним из основных направлений работы было решение задачи прогноза перемещения тропических циклонов на основе гидромеханической модели, предложенной Б.Я. Шмерлиным. На этом пути были достигнуты определенные успехи. Но затем было принято решение перейти к более современному инструментарию: использовать доступные мезомасштабные модели высокого разрешения (WRF). Численная модель была освоена, и работы в этом направлении успешно развиваются (М.А. Новицкий, С.А. Петриченко и др. [13]).

В последнее время все большее внимание уделяется прогнозу опасных атмосферных явлений на Европейской территории России. Сюда относятся прежде всего смерчи. Несколько лет назад начались и быстро развиваются работы по прогнозу смерчеопасных ситуаций (М.А. Новицкий, Б.Я. Шмерлин, О.В. Калмыкова, С.А. Петриченко и др. [12, 14]).

Таким образом, опыт, результаты, инструментарию, накопленные за несколько десятилетий, используются для решения задач, актуальность которых в настоящее время возрастает.

Список литературы

1. Волощук В.М., Ингель Л.Х., Нерушев А.Ф., Петрова Л.И., Пудов В.Д., Шмерлин Б.Я. и др. Тропические циклоны. Результаты исследований советских ученых. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 54 с.

2. Захаров В.Е. Математические модели жизненного цикла тропических ураганов // Труды ИЭМ. 1973. Вып. 3(37). С. 75–148.
3. Иванов В.Н., Пудов В.Д. Структура термического следа тайфуна Тэсс в океане и оценка некоторых параметров энергообмена при штормовых условиях. Тайфун-75. Т. 1. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 66–82.
4. Ингель Л.Х., Калашник М.В., Петриченко С.А., Петрова Л.И., Пудов В.Д., Шмерлин Б.Я., Ярошевич М.И. Исследования по метеорологии и океанологии тропической зоны // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сборник статей, посвященный 50-летию НПО «Тайфун». Т. 1. Обнинск, 2010. С. 183–200.
5. Ингель Л.Х., Калашник М.В., Перестенко О.В., Свиркунов П.Н., Шмерлин Б.Я. О некоторых малоизученных механизмах гидродинамической неустойчивости в атмосфере // Вопросы физики атмосферы. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. С. 247–272.
6. Ингель Л.Х., Феофилактов В.Д., Ярошевич М.И. Регистрация сейсмических сигналов, связанных с торнадо // Докл. РАН. 2002. Т. 386, № 6. С. 813–817.
7. Калашник М.В. О максимальной скорости ветра в тропическом циклоне // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30, № 1. С. 26–30.
8. Калашник А.М., Калашник М.В. О перераспределении углового момента в тропических циклонах // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47, № 6. С. 829–844.
9. Лебедев С.Л., Петрова Л.И. Оценка возможности возникновения тропического циклона по энергии неустойчивости // Метеорология и гидрология. 1994. № 5. С. 68–78.
10. Нерушев А.Ф. Восстановление средних характеристик поля скорости приводного ветра в зонах действия тропических циклонов по данным радиометра SSM/I // Исследование Земли из космоса. 2002. № 4. С. 70–78.
11. Нерушев А.Ф., Петренко Б.З., Крамчанинова Е.К. Определение параметров тропических циклонов по данным СВЧ-радиометра SSM/I // Исследование Земли из космоса. 2001. № 2. С. 61–68.
12. Новицкий М.А., Павлюков Ю.Б., Шмерлин Б.Я., Махнорылова С.В., Серебрянник Н.И., Петриченко С.А., Тереб Л.А., Калмыкова О.В. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчеопасной ситуации // Метеорология и гидрология. 2016. № 10. С. 30–40.
13. Новицкий М.А., Петриченко С.А., Тереб Л.А. Зависимость расчетной траектории тропического циклона северо-западной части Тихого океана от выбора параметризаций физических процессов при использовании модели ANW // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 17–28.
14. Новицкий М.А., Шмерлин Б.Я., Петриченко С.А., Тереб Л.А., Кулижникова Л.К., Калмыкова О.В. Использование индексов конвективной неустойчивости и метеорологических величин для анализа смерчеопасной ситуации в Обнинске 23 мая 2013 года // Метеорология и гидрология. 2015. № 2. С. 13–20.
15. Тайфун-75. Л.: Гидрометеиздат. Т. 1, 137 с., 1977; Т. 2, 150 с., 1978. (Репринт работы приведен на с. 315–323.)
16. Тайфун-78. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 268 с.
17. Тропическая метеорология. Под. ред. В.Н. Иванова // Труды ИЭМ. 1979. Вып. 22(87). 128 с.
18. Тропическая метеорология. Под. ред. В.Н. Иванова // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 32(106). 128 с.

-
19. Тропическая метеорология. Под. ред. В.Н. Иванова // Труды ИЭМ. 1986. Вып. 39(122). 148 с.
 20. Тропическая метеорология. Под. ред. В.Н. Иванова и Л.Х. Ингеля // Труды ИЭМ. 1987. Вып. 42(127). 132 с.
 21. Тропическая метеорология. Под. ред. П.Н. Свиркунова // Труды ИЭМ. 1991. Вып. 54(151). 152 с.
 22. Тропическая метеорология. Труды Международного симпозиума, Нальчик, 1981. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 237 с.
 23. Тропическая метеорология. Труды Второго Международного симпозиума, Гавана, 1982. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 217 с.
 24. Тропическая метеорология. Труды Третьего Международного симпозиума, Ялта, 1985. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 570 с.
 25. Тропическая метеорология. Труды Четвертого Международного симпозиума, Гавана, 1987. Л.: Гидрометеоиздат, 1989. 499 с.
 26. ТРОПЭКС-72. Труды междуведомств. геофизич. экспедиции по программе национального Атлантического тропического эксперимента. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 685 с. (Репринт работы приведен на с. 305–314.)
 27. ТРОПЭКС-74. Труды междуведомственной геофизической экспедиции по программе международного Атлантического тропического эксперимента. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. Т. 1. Атмосфера. 736 с.; Т. 2. Океан. 217 с.
 28. Шмерлин Б.Я. О гидромеханической модели перемещения атмосферных вихрей синоптического масштаба // Исследования вихревой динамики и энергетики атмосферы и проблема климата. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. С. 130–148.
 29. Шмерлин Б.Я., Калашник М.В. Конвективная неустойчивость Рэлея в присутствии фазовых переходов влаги. Формирование крупномасштабных вихрей и облачных структур // Успехи физических наук. 2013. Т. 183, № 5. С. 497–510.
 30. Ярошевич М.И. Динамика интенсивности тропических циклонов в связи с глобальным потеплением // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45, № 3. С. 426–429.
 31. Ingel L.Kh. On the nonlinear dynamics of the boundary layer of intense atmospheric vortex // Dynamics of Atmospheres and Oceans. 2005. Vol. 40, N 4. P. 295–304.
 32. Pudov V.D., Holland G.J. Typhoon and ocean: Results of experimental investigations. BMRC, Bureau of Meteorology Research Centre, Melbourne, Australia. 1994. 50 p.



РАДИАЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

И.И. Крышев

Важным средством обеспечения экологической безопасности при использовании атомной энергии является радиационный мониторинг окружающей среды, представляющий систему регулярных наблюдений за процессами радиоактивного загрязнения окружающей среды, оценки и прогноза радиозэкологической обстановки. В настоящей статье представлены в кратком виде результаты исследований специалистов НПО «Тайфун» по изучению процессов радиоактивного загрязнения окружающей среды, радиозэкологическому моделированию и оценке экологических рисков по данным радиационного мониторинга.

Мониторинг загрязнения окружающей среды радиоактивными продуктами ядерных взрывов

Необходимость контроля радиационной обстановки на территории страны возникла первоначально в связи с широкомасштабными процессами загрязнения окружающей среды в результате испытаний ядерного оружия. За основу сети радиационного мониторинга была взята сеть метеостанций. В 1958 г. директором Института прикладной геофизики (ИПГ) академиком Е.К. Федоровым было принято решение сосредоточить проведение работ по изучению радиоактивного загрязнения окружающей среды продуктами ядерных взрывов на Обнинском полигоне ИПГ, впоследствии преобразованного в отделение ИПГ, филиал ИПГ, а в 1968 г. в самостоятельный Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ), на базе которого и подразделений ЦКБ ГМП в 1986 г. было организовано Научно-производственное объединение «Тайфун».

Научно-методическое обеспечение радиационного мониторинга

На Обнинском полигоне начали работать специально приглашенные для этой цели С.М. Вакуловский, Ц.И. Бобовникова, Я.И. Газиев, И.Л. Кароль, С.Г. Малахов, К.П. Махонько, Г.А. Серeda, А.Н. Силантьев, внесшие впоследствии выдающийся вклад в изучение процессов радиоактивного загрязнения окружающей среды и научно-методическое обеспечение радиационного мониторинга.

В 1961 г. на основании Постановления Совета Министров СССР от 4.02.1961 г. № 103-41 была создана Общегосударственная радиометрическая служба наблюдений и информации с возложением обязанностей по организации и обеспечению систематических наблюдений за радиоактивным загрязнением воздуха, атмосферных выпадений, вод суши и морей, поверхности почвы и снега на радиометрической сети пунктов; проведение радиоизотопного анализа проб; передачи информации и предупреждений о радиоактивном загрязнении; организации в научно-исследовательских институтах Гидрометслужбы проведения исследовательских работ в области изучения распределения радиоактивного загрязнения на территории страны, создания методов прогнозирования и предупреждения о распространении радиоактивного загрязнения.

На Обнинском полигоне с 1961 г. начала создаваться система сбора, обработки и обобщения информации о радиационной обстановке на территории страны с составлением ежеквартальных, полугодовых и ежегодных обзоров, которые с 1985 г. выпускаются в форме ежегодников. Основным составителем этих обзоров был С.Г. Малахов, а с 1972 г. – К.П. Махонько. В 1964 г. на Обнинский филиал ИПГ было возложено научно-методическое руководство всей сетью наблюдений за радиоактивным загрязнением воздуха, воды и почвы на территории страны, включая работы по радиоизотопному анализу этих проб [17].

В 1966–1968 гг. был подготовлен и издан Гидрометеоздатом в четырех частях «Сборник методик по определению радиоактивности окружающей среды» в качестве руководства для организаций, осуществляющих контроль за радиоактивным загрязнением окружающей среды техногенными радионуклидами. Специально для радиометрической сети специалистами ИЭМ было разработано и в 1975 г. издано Гидрометеоздатом «Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Выпуск 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением природной среды», переработанное и актуализированное в последующих изданиях, вышедших в 1982 и 2015 гг. Из других методических разработок ИЭМ и НПО «Тайфун» отметим «Методику массового спектрометрического анализа проб природной среды» (под редакцией А.Н. Силантьева и К.П. Махонько. Л.: Гидрометеоздат, 1984),



Константин Павлович Махонько (1928–2002), ведущий ученый в области радиационного мониторинга окружающей среды и ядерной метеорологии. Внес существенный вклад в организацию Государственной системы радиационного мониторинга и ее научно-методическое обеспечение.



Аркадий Никитич Силантьев (1927–2002), ведущий ученый в области разработки и внедрения в практику методик спектрометрического анализа содержания радионуклидов в объектах окружающей среды.

Фото на борту теплохода «Леонид Собинов», Черное море, научный семинар Ядерного общества СССР «Экология АЭС», июнь 1991 г.

«Методические рекомендации по определению радиоактивного загрязнения водных объектов» (под редакцией С.М. Вакуловского. М.: Гидрометеиздат, 1986) и «Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС (под редакцией К.П. Махонько. Л.: Гидрометеиздат, 1990).

Поведение в окружающей среде радиоактивных продуктов ядерных взрывов

Регулярные наблюдения позволили обнаружить ряд закономерностей в поведении радиоактивных продуктов ядерных взрывов в окружающей среде [8, 11, 13, 15, 17]. Согласно данным наблюдений реальная картина распространения радиоактивных продуктов в приземном слое атмосферы не носит характера движения сплошного потока, а имеет пятнистый характер. Спонтанно

возникающие на земной поверхности пятна радиоактивных выпадений в основном связаны с зонами выпадения атмосферных осадков. В среднем наблюдается перенос радиоактивных продуктов с запада на восток вокруг земного шара в соответствии с господствующим направлением воздушных потоков. С течением времени, независимо от места и высоты взрыва, его радиоактивные продукты перемешиваются в атмосфере и устанавливается сравнительное постоянство уровней глобальных радиоактивных выпадений. Существует годовой ход глобального радиоактивного загрязнения продуктами ядерных взрывов с сезонным максимумом в конце весны – начале лета. Детальные результаты исследований динамики радиоактивных выпадений на территории

СССР в период их максимальных значений представлены в [13]. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 324–335.)

Согласно данным мониторинга, в ряде пунктов наблюдались горячие частицы различной интенсивности [6, 12]. Например, в Обнинске после ядерного взрыва в КНР 14 мая 1965 г. горячие частицы наблюдались в течение 40 суток с максимальной концентрацией 966 частиц на 10^4 м^3 при активности бета-излучателей каждой из частиц в диапазоне 0,037–3,7 Бк. Активность бета-излучателей горячей частицы в Южно-Сахалинске, выпавшей на планшет 17 мая, составляла 370 Бк [17]. Концентрация горячих частиц существенно возрастала в период испытаний ядерного оружия и в отдельных случаях достигала 30 % от суммарной активности аэрозолей приземного воздуха. Существенную роль в исследовании поведения горячих частиц в окружающей среде сыграли работы Я.И. Газиева. Одна из первых разработанных им методик радиографирования зольных остатков проб атмосферных аэрозолей представлена в [6]. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 336–341.)

После прекращения ядерных взрывов в атмосфере наблюдалось постепенное снижение радиоактивного загрязнения приземного воздуха (рис. 1).

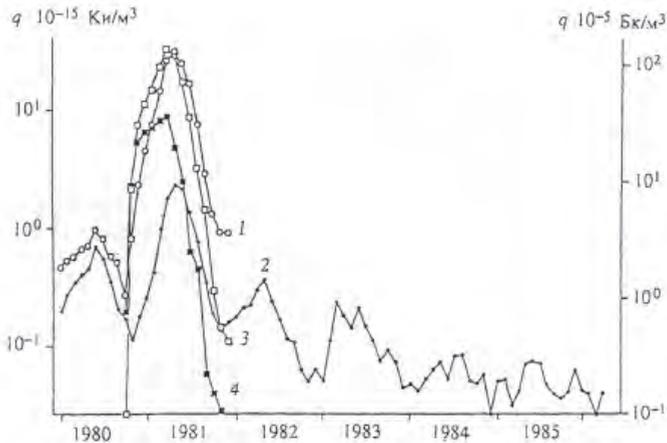


Рис. 1. Динамика среднемесячных концентраций q радионуклидов в приземном слое атмосферы в среднем по СССР в 1980–1985 гг.: 1 — ^{144}Ce ; 2 — ^{137}Cs ; 3 — ^{95}Zr ; 4 — ^{141}Ce [17]



*Козлов Александр Ильич и Яктель Искакович Газиев
на Семипалатинском испытательном полигоне, 2006 год.
Фото из архива Н.К. Валетовой*

На фоне установленных на основе данных мониторинга общих закономерностей, проявляющихся при больших пространственных или временных усреднениях, действовали и другие факторы, приводящие к специфическим особенностям в поведении радионуклидов в окружающей среде, такие как орография подстилающей поверхности, дисперсность аэрозольных частиц, физико-химические формы радионуклидов, влияние погодных условий, ветровой подъем аэрозольных носителей радионуклидов с загрязненной поверхности почвы и др. [15]. Согласно данным многолетних наблюдений, до сих пор сохраняются повышенные уровни загрязнения долгоживущими радионуклидами территории испытательных ядерных полигонов.

Мониторинг трития

В рамках государственного радиационного мониторинга под научно-методическим руководством ИЭМ была создана система регулярных наблюдений («тритиевая сеть») за содержанием трития в атмосферных осадках и поверхностных водах [9]. В результате работы этой сети получены обширные экспериментальные данные (с 1970 г. по настоящее время) о загрязнении

тритием природных вод, рассчитаны выпадения трития с атмосферными осадками, оценен его сток в окружающие моря. Установлена устойчивость пространственного распределения среднегодовых концентраций глобального трития в атмосферных осадках, с аппроксимацией меридионального распределения линейной зависимостью, а широтного – экспоненциальной зависимостью, на которую накладывается максимум в поясе широт 52 – 62° с.ш. (рис. 2).

Показано, что среднегодовые концентрации глобального трития в речных водах в основном определяются его концентрациями в осадках над водосборной площадью реки. Около 70 % трития, выпавшего с атмосферными осадками на территорию страны, стекает в моря Северного Ледовитого океана. Разработана методика расчета запаса и балансовых составляющих запасов трития в морях (Каспийское, Азовское, Черное, Балтийское, Белое). Оценено влияние аварии на Чернобыльской АЭС на содержание трития в природных водах. Натурными исследованиями установлено, что содержание трития в природных водах вблизи некоторых объектов использования атомной энергии (ПО «Маяк», РТП «Атомфлот», ФЭИ, Нововоронежская АЭС) на ограниченных территориях значительно повышены по сравнению с глобальным фоном, но не превышают УВ.

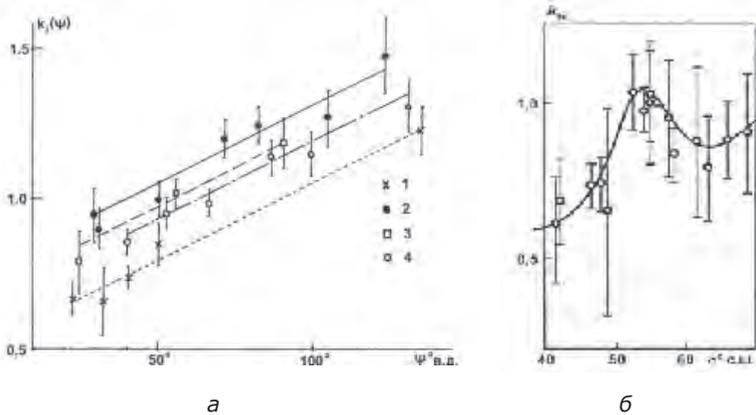


Рис. 2. Распределение относительных концентраций трития в атмосферных осадках: а – меридиональное распределение для узких широтных поясов, б – широтное распределение на долготе Москвы

Исследования радиоактивного загрязнения реки Енисей

Летом 1971 г. экспедицией ИЭМ были обнаружены повышенные уровни содержания ^{137}Cs в донных отложениях Енисейского залива, достигающие 15 кБк/м^2 , что в 4–8 раз выше уровня, обусловленного глобальными выпадениями. Кроме того, в донных отложениях было обнаружено присутствие ^{65}Zn . В последующие годы, начиная с 1972 г., были проведены экспедиционные исследования радиационной обстановки в реке Енисей, на островах и в пойме реки [4, 33]. В результате был установлен перенос техногенных радионуклидов в реке Енисей на расстояния до 2000 км от места сброса промышленных вод ГХК (рис. 3). Выявлены закономерности миграции и накопления более 20 радионуклидов в речной экосистеме, оценены дозы облучения населения и речной биоты [4, 11, 33].

Согласно результатам наблюдений и выполненным на их основе радиоэкологическим оценкам, Горно-химический комбинат в период работы на полную мощность оказывал локальное и региональное влияние на радиоактивность экосистемы реки Енисей. В настоящее время уровень этого воздействия существенно снизился в связи с выводом из эксплуатации промышленных ядерных реакторов ГХК.

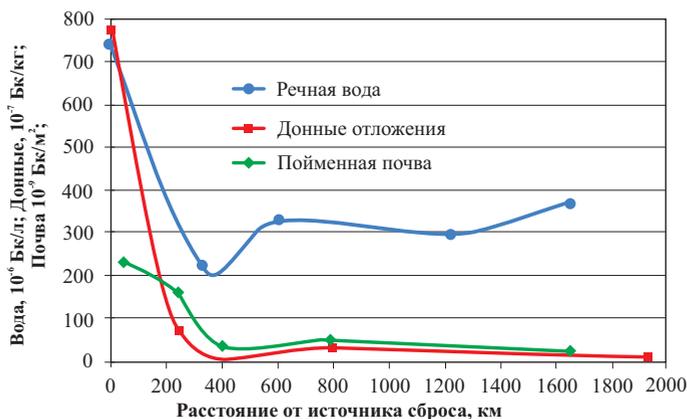


Рис. 3. Содержание ^{137}Cs в речной воде, донных отложениях в р. Енисей и пойменной почве в его долине на разном удалении от места сброса технологических вод ГХК по данным исследований 1973 года

Радиоэкологическое обследование Обь-Иртышской речной системы

В 2004–2006 годы под руководством А.И. Никитина специалистами НПО «Тайфун» Росгидромета совместно с Институтом проблем экологии и эволюции РАН и Тобольской биологической станцией РАН были проведены радиоэкологические наблюдения за содержанием радионуклидов на участке речной системы Теча – Обь протяженностью свыше 1000 км, включая реки Тобол и Иртыш [19, 31].

В ходе комплексного радиоэкологического обследования было определено содержание ^{90}Sr ,



Александр Иванович Никитин (1947–2014), ведущий ученый в области радиационного мониторинга гидросферы. Внес значительный вклад в изучение радиоактивности морей Арктики и Дальнего Востока, Обь-Иртышской речной системы, водных объектов, загрязненных в результате чернобыльской аварии.

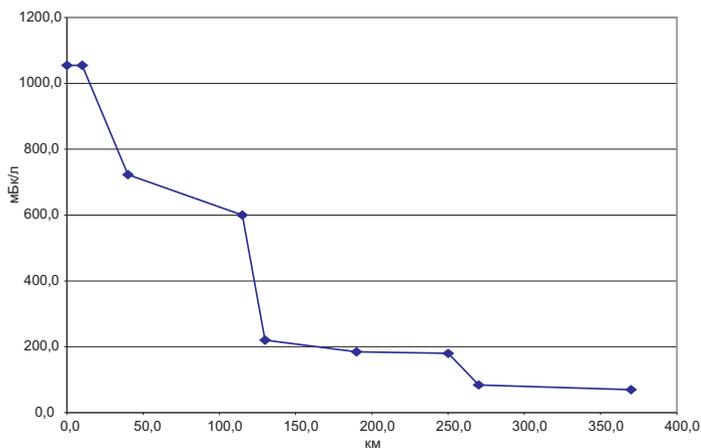


Рис. 4. Изменение объемной активности ^{90}Sr в речной воде Тобола на участке от устья р. Исеть до слияния с р. Иртыш (сентябрь 2004 г.) [19]

^{137}Cs , $^{239+240}\text{Pu}$ и трития в компонентах речной экосистемы, выполнены разработка и тестирование по данным наблюдений радиоэкологической модели миграции радионуклидов в изучаемой речной системе, оценки интегрального радиационного состояния рек и экологического риска. Установлено превышение фонового уровня ^{90}Sr в речной воде на обширном участке речной системы (рис. 4). Причиной образования этого «стронциевого» следа протяженностью более 1000 км, вплоть до впадения Иртыша в реку Обь, является прошлая деятельность ПО «Маяк», в особенности радиоактивные сбросы в реку Теча в начальный период его деятельности (1949–1956 гг.).

Показана необходимость комплексного радиоэкологического мониторинга Обь-Иртышской речной системы с целью надежного контроля за переносом радионуклидов от деятельности объектов использования атомной энергии в этом регионе.

Мониторинг радиоактивного загрязнения морей Арктики

Наблюдения за содержанием искусственных радионуклидов в морях России осуществляются специалистами НПО «Тайфун» с 1961 г. [18]. В 1961 году проводились измерения суммарной активности бета-излучающих радионуклидов, а с 1962–1963 гг. определялось содержание в морской воде ^{90}Sr в водах Баренцева моря. Наблюдаются два периода повышенного содержания искусственных радионуклидов в водах Баренцева моря. Первый из них связан с максимальными радиоактивными выпадениями от атмосферных испытаний ядерного оружия. Причиной второго пика являются сбросы радиоактивных веществ предприятием по переработке отработавшего ядерного топлива в Уиндскейле (ныне Селлафильд, Великобритания).

В 1973 году сотрудники экспедиции ИЭМ во время обследования морей, омывающих Европейский континент, выявили высокие уровни содержания ^{137}Cs в воде Ирландского моря – 2,4 Бк/л, которые превысили глобальные уровни содержания этого изотопа в других морях. Кроме ^{137}Cs , в пробах морской воды был обнаружен ^{134}Cs , отсутствующий в глобальных радиоактивных выпадениях [5, 18]. Наличие этих двух изотопов с разными периодами полураспада дало возможность по изменению их соотношения определять скорость водного переноса радионуклидов в моря Северной Европы и Арктики при наблюдениях

на разных расстояниях от источника сбросов. Впервые был установлен факт дальнего трансграничного переноса сбрасываемых в Ирландское море радионуклидов: через Северное море и вдоль норвежских берегов радиоактивные вещества достигали Баренцева и Карского морей.

В 1992–1994 годы под научным руководством и при непосредственном участии А.И. Никитина были проведены российско-норвежские экспедиции в районах дампинга РАО в Карском море [18]. Показано, что воздействие затопленных РАО практически не сказывается на уровнях радиоактивного загрязнения воды и донных отложений открытых районов арктических морей. Выполнены оценки экологического риска на локальных участках дампинга РАО в заливах Новой Земли.

В августе-сентябре 2002 г. было проведено повторное обследование радиоактивного загрязнения залива Абросимова, являющегося одним из основных районов дампинга РАО в Карском море, показавшее стабильность радиационной обстановки в этом районе.

В настоящее время продолжают совместные исследования специалистов НПО «Тайфун» и Норвегии по комплексному обследованию радиационной обстановки в морях Арктики.



Рабочая встреча экспертов: В.В. Челюканов, О.А. Волковицкий, И.И. Крышев, А.И. Никитин, Киркенес, Норвегия, сентябрь 1994 г.



Карское море, залив Абросимова, 2002 г. Отбор проб гидробионтов. Справа – А.И. Никитин



Российско-Норвежская экспедиция, 2012 г. Карское море. Подготовка к отбору проб донных отложений. Слева – В.М. Шершаков

Исследования радиационных и эколого-геофизических последствий чернойбыльской аварии

Специалистами НПО «Тайфун» выполнен большой объем исследований по изучению и мониторингу радиационных последствий чернойбыльской аварии, включая исследования горячих частиц, физико-химических форм нахождения чернойбыльских радионуклидов в природных средах, реконструкции загрязнения почвы йодом-131, ветрового переноса радионуклидов, динамики радиоактивного загрязнения озер, рек и морей, смыва радионуклидов с водосборных территорий, эффективности водоохранных сооружений, деформации электрических характеристик атмосферы в зоне аварии, прогноза переноса продуктов аварии, обследования радиоактивного загрязнения территории населенных пунктов [1–4, 7, 10, 14, 20, 21, 24, 26–28, 30].

Воздействие чернойбыльской аварии на радиоактивность окружающей среды было обнаружено радиометрической службой Госкомгидромета утром 26 апреля 1986 г. при проведении штатных наблюдений за мощностью экспозиционной дозы гамма-излучения на площадке метеостанции в г. Чернобыле. Сразу после аварии наибольшую опасность представляли радиоизотопы йода и некоторые другие короткоживущие радионуклиды. Присутствие радиоактивного йода в атмосфере явилось также надежным индикатором распространения аварийного выброса.

В планшетных пробах Госкомгидромета, снятых 26 апреля в 8 часов утра, на большой территории был обнаружен йод-131 (рис. 5). Одна из первых методик построения карт плотности загрязнения почвы йодом-131 после аварии на Чернобыльской АЭС, разработанная К.П. Махонько, представлена в [14]. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 342–348.)

В результате чернобыльской аварии кратковременное увеличение радиоактивности выпадений было зарегистрировано службой Госкомгидромета на значительной части территории России: (Брянская, Тульская, Калужская, Орловская и другие области, в Свердловске, Хабаровске и Владивостоке) (рис. 6). На отдельных территориях максимальные величины активности выпадений в 10 тысяч раз и более превышали фоновые уровни, наблюдавшиеся до аварии [20].

Сотрудники НПО «Тайфун» первую радиационную разведку на двух автомашинах и одном вертолете в ближней зоне ЧАЭС выполнили 30 апреля 1986 года. По результатам первых радиационных разведок была построена карта загрязнения, представленная в Правительственную комиссию 2 мая 1986 г., по которой было принято решение о незамедлительной эвакуации населения из населенных пунктов 30-км зоны общей численностью 116 000 человек [3].

Начиная с 1 мая 1986 г. сотрудниками НПО «Тайфун» осуществлялся мониторинг загрязнения водных объектов. Был разработан оперативный прогноз, показавший, что уровни загрязнения поверхностных водоемов не превысят действующих нормативов для населения. На основании этого прогноза было отклонено дорогостоящее предложение о строительстве обводного канала р. Припять – р. Днепр вокруг загрязненных



Рис. 5. Первая карта-схема суточных атмосферных выпадений йода-131 по данным наблюдений Госкомгидромета 26 апреля 1986 г., построена К.П. Махонько



Рис. 6. Карта-схема распространения радиоактивных продуктов после аварии на ЧАЭС, построена К.П. Махонько. Нанесено максимальное отношение выпадений суммарной активности бета-излучателей к фону, уменьшенное в 1000 раз.

водосборов, что позволило более рационально расходовать средства, направляемые на ликвидацию последствий аварии.

Для экспериментальной проверки предположения о возможности возникновения в аварийном реакторе неуправляемой цепной реакции в НПО «Тайфун» было оперативно сконструировано и изготовлено устройство, позволившее 16 и 19 мая отобрать с вертолета пробы аэрозолей вблизи развала реактора. Результаты гамма-спектрометрического анализа показали отсутствие в пробах короткоживущих изотопов, характерных для неуправляемой цепной реакции. На основании этих экспериментальных данных было принято решение об отсутствии необходимости засыпки аварийного реактора материалом, поглощающим нейтроны [3].

Приказом Госгидромета от 13.06.1986 г. № 137 была создана комплексная экспедиция НПО «Тайфун», которой было поручено совместно с территориальными подразделениями проведение радиационного контроля на загрязненной территории. Сотрудниками этой экспедиции была предложена новая экспрессная методика измерения и обработки результатов измерений проб почвы. С использованием этой методики были оперативно измерены несколько тысяч проб почвы, по результатам которых



Чернобыль, 1986 г. Слева – водитель Н. Корнилкин, в центре – С.М. Вакуловский, справа – А.И. Никитин. На заднем плане – машина, на которой проводилась радиационная разведка от Киева до «рыжего» леса (3–5 Р/ч). Фото из архива С.М. Вакуловского.

Правительственная комиссия принимала дополнительные решения об обеспечении радиационной безопасности населения.

На последующих этапах специалисты НПО «Тайфун» принимали активное участие в получении информации о радиационной обстановке на загрязненных территориях, анализе пространственно-временных особенностей формирования чернобыльского аварийного следа. В первый период после аварии почва наиболее сильно была загрязнена сравнительно короткоживущими нуклидами – ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , ^{239}Np , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{89}Sr . В ближней к месту аварии зоне почвы были обогащены ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{141}Ce , ^{144}Ce , в дальней – ^{131}I , ^{137}Cs и ^{134}Cs . После распада ^{131}I и других короткоживущих нуклидов на большей части аварийного следа за пределами зоны отчуждения, определяющими в радиоактивном загрязнении местности являлись ^{137}Cs и ^{134}Cs , а в настоящее время – ^{137}Cs . Установлен длительный характер радиоактивного загрязнения непроточных водоемов на территории аварийного следа.

Согласно данным мониторинга отмечается накопление чернобыльских радионуклидов в таких компонентах окружающей среды, как лесная и озерная биота, донные отложения водоемов и почва. Предложена концепция «радионуклидного экологического кольца» для характеристики процессов замедления выноса радионуклидов в результате их биоаккумуляции и сорбции в экосистемах.



*С.М. Вакуловский
и Я.И. Газиев.
Обследование
загрязнения местности*



*С.М. Вакуловский. Измерение
радиоактивности донных отложений
озера Кожановское с помощью
погружного гамма-спектрометра*

*Радиоэкологическое обследование территории Брянской области,
загрязненной в результате чернобыльской аварии, 1999 г.
Фото из архива С.М. Вакуловского.*

Особо отметим уникальные результаты исследований В.В. Смирнова электропроводности воздуха и интенсивности ионообразования для ближней зоны Чернобыльской АЭС (табл. 1). Можно видеть, что спустя год после аварии в зоне ЧАЭС электропроводность воздуха была более чем в 100 раз выше, чем для других районов. Причем в зоне ЧАЭС имел место избыток отрицательного объемного заряда [21].

*Т а б л и ц а 1
Среднесуточные значения отрицательной электрической проводимости
воздуха и интенсивности ионообразования
(на высоте 1 м от земной поверхности)*

Район и дата измерений	Проводимость воздуха, фСм/м	Интенсивность ионообразования, см ⁻³ с ⁻¹
Заросшее поле в 7 км от ЧАЭС, май 1987 г.	800±150	2000
Житомирская обл., пос. Игнатополь, лето 1984 г.	3,3±1,5	15
Обнинск, лето 1983 г.	1,4±1,0	10

Согласно результатам этих исследований, концентрация аэроионов в приземном воздухе в зоне ЧАЭС в 1987 г. значительно (в 3–10 раз) превышала значения, допустимые для воздуха производственных и общественных помещений. Таким образом, ближняя зона ЧАЭС в первые годы после аварии являлась достаточно сильным и постоянным источником атмосферных ионов, что могло оказывать дополнительное воздействие на экологические параметры атмосферного воздуха в зоне радиационной аварии.

Моделирование миграции радионуклидов

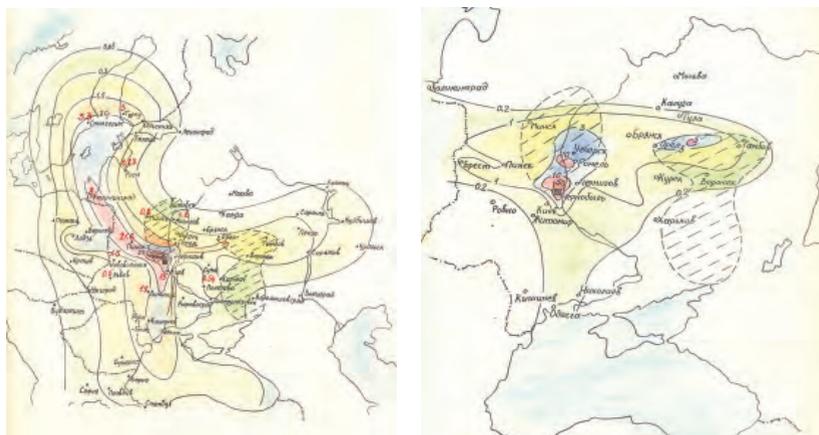
Существенный вклад в развитие геофизических моделей миграции радионуклидов в природных средах внесли исследования В.А. Борзилова [1, 2, 26, 27], разработавшего методологию прогнозирования поведения загрязняющих веществ при их аварийном поступлении в окружающую среду.

Методология включает в себя комплекс моделей атмосферного переноса и осаждения загрязняющих веществ на подстилающую поверхность и их последующего поведения в почве и реках, восстановления источника радиоактивного выброса, а также методы определения входящих в модели параметров [1]. Использование этой модели для минимизации последствий чернобыльской аварии позволило получить расчетным путем карты загрязнения местности в зоне чернобыльского следа, которые показали хорошую сходимость с данными наблюдений (рис. 7).

Были разработаны прогнозы вторичного загрязнения рек на территории аварийного следа за счет процессов смыва радионуклидов с водосборов во время



Владимир Андреевич Борзилов (1942–1992), ведущий ученый в области разработки физико-математических моделей миграции загрязняющих веществ в окружающей среде, оценки и прогнозирования радиационных последствий чернобыльской аварии, комплексного обследования критических экологических ситуаций. Внес значительный вклад в развитие международного научного сотрудничества в НПО «Тайфун».



а

б

Рис. 7. а) Расчетная карта плотности выпадения йода-131 ($\text{Ки}/\text{км}^2$) в результате чернобыльской аварии [1]. Экспериментальные данные нанесены красным цветом, заштрихованы зоны выпадения атмосферных осадков в период прохождения радиоактивного облака. б) Расчетная карта плотности выпадения цезия-137 ($\text{Ки}/\text{км}^2$).

сильных дождей, осенних и весенних паводков, оценена эффективность водоохраных сооружений в зоне чернобыльской аварии.

В фундаментальных исследованиях Е.К. Гаргера и К.П. Махонько [7, 16] изучены закономерности ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности земли, разработаны геофизические модели ветрового переноса радионуклидов, предложены методы экспериментального определения основных модельных параметров. Выполнены прогнозные расчеты концентрации радиоактивной пыли, поднятой ветром с подстилающей поверхности на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению.

Под научным руководством В.М. Шершакова в НПО «Тайфун» создана современная система комплексной поддержки принятия решений аварийного реагирования при чрезвычайных ситуациях на радиационно опасных объектах, связанных с радиоактивным загрязнением окружающей среды [22, 32]. Разработан комплекс программных средств, включающий компьютерные расчеты процессов переноса радионуклидов в компонентах окружающей среды с использованием моделей разного

пространственного масштаба, методы обработки параметров радиационной обстановки, анализ и прогноз аварийной радиационной ситуации, а также оценку эффективности различных противоаварийных действий, с учетом возможных неопределенностей. Разработанные методы прошли апробацию на многочисленных данных измерений и радиационного мониторинга при анализе последствий чернобыльской аварии, аварии на Сибирском химическом комбинате, радиационной аварии на АЭС «Фукусима», а также нашли практическое применение при создании компьютерной системы RECASS как базовой системы ЕРАСКО на территории Российской Федерации, отдельные функциональные блоки которой прошли успешную апробацию в системах радиационного мониторинга вокруг российских АЭС. Кроме того эти методы и программные средства вошли в состав общеевропейской системы RODOS поддержки принятия решений при ядерных авариях.

Существенной особенностью загрязнения окружающей среды в результате аварии является неравновесный характер радиоэкологических процессов в течение длительного времени. Для описания поведения радионуклидов в экосистемах разработана динамическая модель ЭКОМОД, позволяющая прогнозировать неравновесные процессы миграции радионуклидов, включая нелинейные динамические эффекты в накоплении радионуклидов биотой, биологический перенос радионуклидов в морях и реках. Модель также включает в себя расчет мощности дозы внутреннего и внешнего облучения организмов [29, 30]. Модель ЭКОМОД нашла практическое применение в задачах оценки радиоэкологической обстановки на территории ВУРС, аварийного чернобыльского следа, дампинга РАО в арктических морях, прогнозирования радиэкологических последствий аварии на АЭС «Фукусима».

Оценка воздействия на окружающую среду

В.А. Борзилов внес значительный вклад в создание методологии комплексного обследования критических экологических ситуаций, оценки воздействия на окружающую среду объектов использования атомной энергии. При его непосредственном участии и руководстве специалистами НПО «Тайфун» совместно с Воронежским государственным университетом, ВНИИСХРАЭ, ИБФ, ИЭМЭЖ был выполнен уникальный комплекс исследований

по оценке воздействия радиационного и нерадиационного техногенных факторов на радиоэкологическую обстановку в районе расположения Нововоронежской АЭС. Проанализированы эколого-географические характеристики района АЭС, включая природные условия, региональный климат, структуру землепользования и лесопользования, гидрографическую сеть, растительный и животный мир, водохозяйственный баланс территории. Определены показатели радиационного фона. Выполнены оценки влияния на радиационную обстановку выбросов и сбросов АЭС в штатных условиях и при различных сценариях радиационных аварий. Оценено воздействие выбросов тепла и влаги из градирен на микроклимат и метеорологические процессы в окрестностях НВАЭС. Полученный методический опыт в организации комплексных радиоэкологических исследований и ОВОС в дальнейшем был широко использован при выполнении НИР в рамках ФЦП ЯРБ.

Оценка экологического риска по данным радиационного мониторинга

Специалистами НПО «Тайфун» Росгидромета впервые в отечественной и мировой практике разработаны методические документы по оценке радиационной безопасности окружающей среды на основе методологии анализа риска и данных мониторинга радиационной обстановки: Рекомендации Р 52.18.787–2013, Р–52.18–820–2015, Р–52.18.852–2016, Р–52.18.853–2016, Р–52.18–863–2017. Разработанные методические рекомендации апробированы для различных радиоэкологических ситуаций как в штатных условиях эксплуатации объектов использования атомной энергии, так и для случаев радиационных аварий (табл. 2).

Согласно выполненным оценкам, деятельность рассмотренных ОИАЭ (АЭС, радиохимических комбинатов, уранового производства) не приводила в исследуемый период к превышению экологически безопасного уровня облучения и соответствующего ему значения экологического риска для биоты.

Особенностью методологии анализа экологического риска является переход от множества параметров радиационной обстановки к единому интегральному показателю качества окружающей среды – уровню риска [10]. Это позволяет сравнивать на единой методической основе различные объекты использования атомной энергии, рационально организовать мониторинг

Т а б л и ц а 2

Сравнительные оценки экологических рисков от радиоактивного загрязнения окружающей среды

Объект использования атомной энергии	Наземная биота	Водная биота
Белоярская АЭС (2000–2016)		$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-2}$
Ленинградская АЭС (2000–2016)	$8 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-4}$
Нововоронежская АЭС (2000–2016)	$1 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$
ПО «Маяк» ВУРС (2017)	0,001–1	0,007–0,7
Сибирский химический комбинат 2000–2008 гг. 2009–2016 гг.	$1 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-1}$ $1 \cdot 10^{-5} - 9 \cdot 10^{-4}$
Горно-химический комбинат 2000–2010 гг. 2011–2016 гг.	$1 \cdot 10^{-5} - 6 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$
Приаргунское ПГХО 2000–2016	$4 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-1} - 6 \cdot 10^{-1}$

П р и м е ч а н и е. Согласно рекомендациям МКРЗ, экологический риск определяется как отношение мощности дозы облучения организмов к экологически безопасному уровню облучения (БУОБ).

радиационной обстановки, ранжировать загрязненные территории, оптимизировать защитные меры по обеспечению приемлемого уровня радиационного риска, что имеет существенное практическое значение для обоснования принятия решений в области охраны окружающей среды и обеспечения устойчивого развития ядерной энергетики. Предлагается использовать разработанные в рекомендациях Р–52.18.852–2016 и Р–52.18.853–2016 контрольные уровни как природоохранные показатели качества окружающей среды в отношении радиоактивности.

Заключение

Накопленный в НПО «Тайфун» многолетний опыт в области радиационного мониторинга окружающей среды активно используется на современном этапе для решения широкого круга задач.

Специалистами ИПМ НПО «Тайфун» осуществляется научно-методическое руководство сетью государственного радиационного мониторинга Росгидромета. Сеть мониторинга

Росгидромета генерируется значительный объем информации о радиационной обстановке на территории РФ, предоставляемой НПО «Тайфун» государственным органам власти и населению в виде ежегодников, справок и бюллетеней, а также на Интернет-сайтах Единой государственной автоматизированной системы радиационного мониторинга (ЕГАСМРО) и Межведомственной информационной системы (МИС) «Радиационная безопасность населения Российской Федерации» на странице Росгидромета.

НПО «Тайфун» активно сотрудничает с организациями ГК «Росатом» в части развития ЕГАСМРО, прогнозирования радиационной обстановки и информационной поддержки принятия решений при радиационных авариях на объектах использования атомной энергии, обоснования размещения в районах АЭС стационарных постов контроля за содержанием радионуклидов в аэрозолях приземного воздуха и атмосферных выпадениях, нормирования выбросов и сбросов радиоактивных веществ, оценки воздействия ОИАЭ на окружающую среду.

Данные многолетнего радиационного мониторинга в районах расположения ОИАЭ стали основой для коллективных монографий, подготовленных специалистами ИБРАЭ РАН, НПО «Тайфун», ВНИИРАЭ, МРНЦ, НТЦ ЯРБ «Ростехнадзора» в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года»: «Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту», «Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома» (Москва, 2015). В настоящее время начата работа по подготовке актуализированных вторых изданий этих монографий.

Опыт исследований НПО «Тайфун» в области радиационного мониторинга окружающей среды, моделирования процессов переноса радионуклидов и оценки экологического риска востребован на международном уровне. Специалистами объединения получены важные научные результаты в рамках международных проектов по безопасности гражданских ядерных реакторов, оценки и прогнозирования последствий чернобыльской аварии, радиоэкологического мониторинга Обь-Иртышской речной системы и реки Енисей, радиоэкологии Арктики, валидации и тестирования радиоэкологических моделей по данным мониторинга. Результаты исследований НПО «Тайфун» применены на практике при подготовке ключевых публикаций МАГАТЭ,

НКДАР ООН и международной программы АМАП по вопросам радиационной безопасности окружающей среды.

Для дальнейшего укрепления радиационной безопасности на территории России необходимо развитие систем комплексного радиоэкологического мониторинга и информационно-аналитических систем контроля и управления экологической безопасностью, совершенствование методов оперативного выявления изменений в радиационной обстановке и реагирования на радиационные угрозы, повышение технического уровня ЕГАСМРО и АСКРО [23, 25].

Существующие системы АСКРО, ориентированные на контроль МАЭД, не позволяют выявить загрязнение окружающей среды бета- и альфа-излучающими радионуклидами. На ряде ОИАЭ используются устаревшие нерепрезентативные средства отбора проб, не внедряются современные автоматические средства наблюдения, оснащенные алармовыми системами, позволяющими в первые часы наступления опасной радиационной ситуации отреагировать и предотвратить распространение радиоактивных веществ в окружающую среду. Необходимо расширить количество лабораторий сети радиационного мониторинга, выполняющих спектрометрический анализ и обновить устаревшую аппаратуру, а также дооснастить сеть воздухофильтрующими установками нового поколения, разработанными в НПО «Тайфун». Следует обеспечить согласованное функционирование СРМ Росгидромета и систем наблюдения, находящихся в ведении ОИАЭ, а также сопоставимость данных наблюдений за радиационной обстановкой на территории РФ, включая районы расположения объектов использования атомной энергии.

Требуется разработка и актуализация нормативно-методических документов по регулированию проведения мониторинга и прогнозированию радиационной обстановки на различных стадиях жизненного цикла ОИАЭ, при реабилитации загрязненных радионуклидами территорий, контроле трансграничного переноса радионуклидов и радиоэкологическом мониторинге углерода-14 и других радионуклидов глобального распространения. Следует предусмотреть создание базы радиоэкологических данных и сохранение фактографических знаний в области радиационного мониторинга и радиационной безопасности окружающей среды.

Список литературы

1. Борзилов В.А. Методы физико-математического моделирования аварийного загрязнения окружающей среды и их применение в работах по ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС: Дис. на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук. Обнинск: НПО «Тайфун», 1989. 239 с.
2. Борзилов В.А., Седунов Ю.С. Моделирование и прогноз радиационной обстановки на реках аварийной зоны Чернобыльской АЭС // Доклады АН СССР. 1988. Т 301, № 4. С. 826–829.
3. Вакуловский С.М. Результаты работы учреждений Росгидромета по мониторингу радиационной обстановки на территориях, пострадавших вследствие аварии на ЧАЭС (на ранней стадии). Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий: последствия и пути преодоления // Сборник трудов Международной научно-практической конференции (Обнинск, 16–21 апреля 2016 г.). Под ред. д-ра техн. наук В.М. Шершаква. Обнинск, ФГБУ «НПО «Тайфун», 2016. С. 60–72.
4. Вакуловский С.М., Демьянченко З.А., Катрич И.Ю., Колесникова Л.В., Уваров А.Д. Радиоактивное загрязнение поверхностных вод суши на территории России в 1961–2008 гг. Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Сборник статей. Том 2. Обнинск: ГУ «НПО «Тайфун», 2010. С. 115–127.
5. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западно-европейских радиохимических заводов // Атомная энергия. 1985. Т. 58, вып. 6. С. 445–449.
6. Газиев Я.И. Методика радиографирования зольных остатков проб атмосферных аэрозолей. Радиоактивность атмосферы // Труды ИЭМ. 1972. Вып. 1(32). С. 117–122. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 336–341.)
7. Гаргер Е.К., Жуков Г.П., Седунов Ю.С. К оценке параметров ветрового подъема радионуклидов в зоне Чернобыльской атомной электростанции // Метеорология и гидрология. 1990. № 1. С. 5–9.
8. Кароль И.Л. Радиоактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 366 с.
9. Катрич И.Ю. Мониторинг трития в природных водах СССР (России): Дис. на соискание ученой степени д-ра геогр. наук. Обнинск: НПО «Тайфун», 2009.
10. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. Второе издание, переработанное и дополненное. М.: ИзДАТ, 2010. 497 с.

11. Малахов С.Г. Соотношение между запасами стронция-90 в стратосфере и его выпадениями на поверхность земли. Радиоактивность атмосферы // Труды ИЭМ. 1972. Вып. 1(32). С. 15–26.
12. Малахов С.Г., Махонько К.П. Горячие аэрозольные частицы в атмосфере // Атомная энергия. 1963. Т. 15, вып. 3. С. 238–245.
13. Малахов С.Г., Силантьев А.Н., Бобовникова Ц.И., Брендаков В.Ф., Махонько К.П., Полякова Т.В., Савченкова А.А., Чуркин В.Н. Исследование динамики радиоактивных выпадений на территории СССР в 1963–1967 гг. Радиоактивность атмосферы // Труды ИЭМ. 1970. Вып. 17. С. 5–16. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 324–335.)
14. Махонько К.П. Методика построения карт плотности загрязнения почвы йодом-131 после аварии на Чернобыльской АЭС. Эколого-геофизические аспекты ядерных аварий. Под ред. В.А. Борзилова, И.И. Крышева. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 108–114. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 342–348.)
15. Махонько К.П. Поведение в атмосфере радиоактивных продуктов ядерных взрывов. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 164 с.
16. Махонько К.П. Ветровой подъем радиоактивной пыли с земли. Обнинск: НПО «Тайфун», 2008. 427 с.
17. Махонько К.П., Павлова Л.Н. Радиоактивные продукты в атмосфере СССР от китайских ядерных взрывов. СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 139 с.
18. Никитин А.И., Вакуловский С.М. Радиоактивное загрязнение морей, омывающих территорию России (1961–2008 гг.). Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Сборник статей. Том 2. Обнинск: ГУ «НПО «Тайфун», 2010. С. 128–141.
19. Никитин А.И., Крышев И.И., Чумичев В.Б., Крышев А.И., Валетова Н.К., Кабанов А.И., Катрич И.Ю., Рябцев И.А., Пельгунова Л.А., Полякова Н.И., Родин В.М., Мироненко А.Н. Радиоэкологический мониторинг Обь-Иртышской речной системы // Сборник материалов Международной конференции «Радиоэкология: итоги, современное состояние и перспективы» (Москва, 3–5 июня 2008 года). М., 2008. С.151–167.
20. Радиоэкологические последствия чернобыльской аварии. Под ред. И.И. Крышева. М.: Ядерное общество, 1991. 192 с.
21. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. М.: Гидрометеиздат, 1992. 312 с.
22. Трахтенгерц Э.А., Шершаков В.М., Камаев Д.А. Компьютерная поддержка управления ликвидацией последствий радиационного воздействия. М.: СИНТЕГ, 2004. 460 с.
23. Шершаков В.М., Булгаков В.Г., Иванов В.Н., Мухалев В.Н. и др. Отчет рабочей группы по определению причин и источника рутения-106 на территории России в сентябре-октябре 2017 года. Обнинск: ФГБУ «НПО «Тайфун», 2017. 139 с.

-
24. Шершаков В.М., Булгаков В.Г., Каткова М.Н., Яхрюшин В.Н., Бородин Р.В., Уваров А.Д. Радиоактивное загрязнение территории населенных пунктов Российской Федерации цезием-137, стронцием-90 и плутонием-(239+240) в результате чернобыльской аварии. М.: ООО «Информполиграф», 2012. 312 с.
25. Шершаков В.М., Булгаков В.Г., Крышев И.И., Косых В.С., Бурков А.И., Прописнова М.В. Экологический мониторинг ядерно и радиационно опасных объектов // Безопасность окружающей среды. 2010. № 3. С. 12–16.
26. Borzilov V.A., Klepikova N.V. Effect of meteorological conditions and release composition on radionuclide deposition after the Chernobyl accident. *The Chernobyl Papers*. Richland, WA. 1993. P. 47–68.
27. Borzilov V.A., Konoplev A.V., Bulgakov A.A. Application of the Chernobyl experience in developing methodology for assessing and predicting consequences of radioactive contamination of the hydrosphere. *IAHS Publ.* 219. 1994. P. 157–167.
28. Kelly G.N., Shershakov V.M. (Ed.). Environmental contamination, radiation doses and health consequences after the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry. Special Commemorative Issue*. 1996. 64 p.
29. Kryshev I.I., Kryshev A.I., Sazykina T.G. Dynamics of radiation exposure to marine biota in the area of the Fukushima NPP in March–May 2011 // *J. of Environmental Radioactivity*. 2012. Vol. 114. P. 157–161.
30. Kryshev I.I., Sazykina T.G., Kryshev A.I. The Chernobyl accident and aquatic biota. In: *Modelling Radioactivity in the Environment*. Oxford, Elsevier Science Ltd. 2003. P. 391–416.
31. Nikitin A.I., Chumichev V.B., Valetova N.K. The current content of artificial radionuclides in the water of the Tobol-Irtysh river system (from the mouth of the Iset River to the confluence with the Ob River) // *J. of Environmental Radioactivity*. 2007. Vol. 96, N 1–3. P. 138–143.
32. Shershakov V.M., Kosykh V.S., Borodin R.V. Radioecological Analysis Support System (RECASS) // *Radiation Protection Dosimetry*. 1993. Vol. 50. P. 2–4.
33. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Yu.V., Malyshev S.V., and Tertyshnik E.G. Radioactive Contamination of the Yenisei River // *J. of Environmental Radioactivity*. 1995. Vol. 29, N 3. P. 225–236.



МОНИТОРИНГ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

М.А. Запевалов, В.А. Сурнин, И.В. Семенова

Загрязнение окружающей среды вредными химическими веществами в современном мире носит глобальный характер. В настоящее время в коммерческом обороте находится около 248 тыс. химических веществ, а темпы их производства и применения продолжают расти. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), около 40 тыс. химических соединений обладают весьма вредными для живых организмов свойствами, а 12 тыс. – токсичны.

Исследование химического загрязнения окружающей среды начало развиваться в Институте экспериментальной метеорологии (ИЭМ) в 1970-х годах.

Полученные в то время результаты фактически обеспечили развитие этого направления НПО «Тайфун» на десятилетия вперед.

Научно-методическое обеспечение мониторинга химического загрязнения окружающей среды

В 70-х годах в СССР была организована Общегосударственная служба наблюдений и контроля за уровнем загрязнения внешней среды (ОГСНК). Она функционировала на базе организаций Госкомгидромета (включая сети наблюдений) и ряда других министерств и ведомств. Эта служба в неизменном виде существует до настоящего времени и осуществляет регулярные наблюдения за уровнем загрязнения компонентов окружающей среды (атмосферы, водных объектов, почвы) и проводит сопутствующие гидрометеорологические наблюдения.

В 1973 г. на ИЭМ были возложены обязанности головного учреждения по изучению и мониторингу химического загрязнения почв на территории СССР. Несколько позже ИЭМ было поручено наблюдение за уровнем загрязнения атмосферного воздуха бенз(а)пиреном и тяжелыми металлами (в части отбора и анализа проб)¹. Во многом выбор ИЭМ был обусловлен наличием современной для того времени экспериментальной базы института и квалифицированного персонала.

До 1973 года основное направление работы ИЭМ по мониторингу было связано с изучением радиоактивного загрязнения окружающей среды. Однако после появления новых задач ряд специалистов были срочно переориентированы на исследование химического загрязнения окружающей среды.

Активная научно-исследовательская и прикладная деятельность в новом направлении отражена в серии сборников «Загрязнение природных сред», регулярно издание которых начато в 1970-х годах в Трудах ИЭМ. Научным руководителем и организатором развития работ по мониторингу загрязнения почв и атмосферного воздуха в этот период по праву следует считать

¹ Работы по мониторингу бенз(а)пирена и тяжелых металлов в атмосферном воздухе проводятся на основании распоряжения Росгидромета от 18.01.1988 г. № 250-70 «О расширении работ по контролю содержания в атмосферном воздухе городов бенз(а)пирена и тяжелых металлов» и приказов Росгидромета от 21.04.1999 г. № 52 «О совершенствовании работ по мониторингу загрязнения атмосферного воздуха городов без(а)пиреном» и от 31.10.2000 г. №156 «О введении в действие порядка подготовки и представления информации общего назначения о загрязнении окружающей природной среды».



*Малахов Спартак Геннадьевич
(1925–1997),
канд. физ.-мат. наук.
Работал на Обнинском полигоне
ИПГ (затем в ИЭМ,
НПО «Тайфун») с 1958 года до кон-
ца жизни, один из ведущих специа-
листов СССР в области мониторинга
загрязнения
окружающей среды.*



*Бобовникова Цилия Иосифовна
(1927–2013), канд. техн. наук.
Работала в ИЭМ
(затем ИПМ НПО «Тайфун»)
с 1959 по 2009 год, ведущий
специалист в области
радиохимического анализа, один из
основателей мониторинга
загрязнения окружающей среды
хлорорганическими соединениями.*

С.Г. Малахова. Среди специалистов «первого призыва», стоящих у истоков направления, следует назвать Т.Н. Жигаловскую, Э.П. Махонько, Р.И. Первунину, Ц.И. Бобовникову, В.В. Егорова, Э.И. Бабкину, А.И. Шилину.

Работы по научно-методическому обеспечению мониторинга загрязнения почв сразу разделились на два направления, которые остались неизменными и до настоящего времени: мониторинг токсикантов промышленного происхождения (тяжелые металлы, нефтепродукты, бенз(а)пирен, фториды) и мониторинг токсикантов сельскохозяйственного происхождения (пестициды). Такое деление вполне обосновано, учитывая специфику источников загрязнения и поведения этих классов химических соединений в окружающей среде.

Уже в первых публикациях [12, 18, 19] закладываются научные основы мониторинга химического загрязнения почв и мониторинга загрязнения атмосферы аэрозолями (тяжелые металлы, бенз(а)пирен). Интерес к мониторингу загрязнения атмосферного воздуха обусловлен тем, что для токсикантов промышленного происхождения (ТПП) атмосфера является основным источником поступления загрязняющих веществ на почву. Первые данные о содержании микроэлементов в приземном слое атмосферы над территорией СССР, полученные с помощью разработанного в ИЭМ метода, представлены в репринте публикации Т.Н. Жигаловской с соавт. [12] на с. 381–401 данного сборника.

Почва как объект мониторинга рассматривается с учетом ее специфики: замедленной миграции и накопления загрязняющих веществ, поступающих из сопредельных сред (атмосфера, вода), необходимости учета форм нахождения, которые обуславливают различную подвижность и доступность растениями, возможности токсического воздействия на человека через перенос по пищевым цепям с продуктами питания.

Одновременно с разработкой методологических основ мониторинга проводятся обширные экспериментальные работы по обследованию уровней загрязнения почв:

- тяжелыми металлами в районах расположения крупных источников выбросов (в первую очередь предприятий черной и цветной металлургии, теплоэнергетики);
- пестицидами в районах их применения (в 1970–1980-х гг. пестициды активно применялись на больших территориях, особенно в южных районах СССР и в Средней Азии).

Проведение экспедиционных работ дало неоценимый фактический материал для оценки уровней загрязнения, проверки теоретических подходов для описания и интерпретации процессов поведения загрязняющих веществ в почвах. Наиболее ярко это проявилось при математическом моделировании миграции загрязняющих веществ в почвах с целью прогнозирования уровней загрязнения.

Для натуральных исследований ИЭМ всегда был характерен комплексный подход, основанный на определении концентраций (уровней загрязнения) в различных элементах системы (почвах, воздухе, воде, растениях). Например, для оценки источников загрязнения почв проводили экспериментальные исследования

выпадения из атмосферы и последующего перехода токсикантов из загрязненных почв в растения.

Системный подход в совокупности с глубоким аналитическим изучением процессов в почвах показал, что переход тяжелых металлов из почвы в растения зависит от формы их нахождения и при этом наиболее активно переходят растворимые формы металлов. Из этого следовал важный вывод о необходимости нормирования тяжелых металлов с учетом форм их нахождения в почвах. Формы нахождения в свою очередь определяются почвенными условиями, типом почв, естественными геохимическими условиями. в том числе фоновым содержанием микроэлементов и тяжелых металлов.

В числе приоритетных рассматривались актуальные вопросы, связанные с загрязнением тяжелыми металлами почв промышленных районов. Основное внимание уделяется оценке пространственных размеров влияния промышленных районов на содержание металлов в почве, а также особенностям вертикального распределения в почве и поступления в растительность ряда тяжелых металлов в районе их выброса промышленными предприятиями.

Методологические вопросы мониторинга загрязнения почв, нормирования уровней загрязнения почв, прогнозирования последствий загрязнения почв отражены в многочисленных работах в этот период времени, ряд которых представлен в библиографии к данной статье [1, 2, 12, 17–19, 22].

В 1970-х годах появляются первые статьи, посвященные методическим разработкам. Наблюдательная сеть Росгидромета остро нуждалась в адаптированных методиках для контроля загрязнения почв, и такие методики были разработаны в короткое время.

В 1983 году был выпущен нормативный документ «Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв. Часть I» под редакцией канд. физ.-мат. наук. С.Г. Малахова [10], в котором были приведены методы отбора проб почвы и выпадения вокруг источников выброса в атмосферу токсичных металлов, отбора проб почвы в сельскохозяйственных районах на содержание в них пестицидов и методы определения рН почвы вокруг промышленных объектов. Документ оказался крайне востребованным и определил методические требования к мониторингу загрязнения почв на несколько десятилетий вперед. Наиболее интересные и важные разделы данного документа представлены в репринте на с. 349–380 сборника.

В подготовке материалов активное участие приняли специалисты ИЭМ Э.И. Бабкина, Ц.И. Бобовникова, Л.Б. Алексеева, Г.А. Борисова, Е.П. Вирченко, А.В. Дибцева, В.В. Егоров, Г.Н. Мальцев, А.А. Сиверина, Г.П. Фанаскова.

Были описаны методики определения в пробах почв хлорорганических (ГХЦГ, ДДТ и его метаболиты и др.) и ряда фосфорорганических пестицидов, гербицидов (симазин, атразин, 2,4-Д и др.) и полихлорбифенилов. Были предложены способы проведения интеркалибрации измерений одних и тех же проб в разных лабораториях, формы представления информации о загрязнении почв.

Через год (в 1984 году) была подготовлена вторая часть «Временных методических рекомендаций по контролю загрязнения почв» [11]. Она включила в себя описание методик контроля загрязнения почв нефтепродуктами, а также комплекс методов, позволяющих проводить измерения агрохимических и биологических свойств почвы (ферментативная активность почв, интенсивность дыхания почвы, содержание в почве углерода, подвижного фосфора, аммиачного и нитратного азота и обменных сульфатов).

Общая редакция методических рекомендаций также осуществлена канд. физ.-мат. наук С.Г. Малаховым, а в подготовке материала приняли участие Л.С. Эрнестова, Э.И. Гапонюк, Н.П. Кремленкова.

Большое внимание уделялось разработке методики отбора проб почв в зоне влияния промышленных источников загрязнения. Был проведен статистический анализ большого количества экспериментальных данных, оценено распределение концентраций тяжелых металлов в почве на различных участках и неоднородности полей распределения концентраций [9, 20]. В результате на основе многочисленных экспериментальных данных была обоснована концепция отбора проб почв при оценке уровня загрязнения почв вблизи предприятий, имеющих крупные стационарные источники выбросов тяжелых металлов в атмосферу. Отбор проб было предложено проводить по почвенно-геоморфологическим профилям, исходной точкой которых служит источник загрязнения [9]. Учитывая консервативный характер поведения тяжелых металлов в почвах, предложена периодичность мониторинга один раз в пять лет и построение сетки отбора проб с учетом розы ветров. Полная программа наблюдений

предусматривала отбор проб по 8 румбам на расстояниях от источника выбросов 0,5; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10; 20 км.

Определяющим фактором поведения тяжелых металлов в почвах является их способность к миграции. Исследования [20] показали, что содержание подвижных форм тяжелых металлов зависит от уровня загрязнения почв, причем, чем выше уровни загрязнения, тем больший процент подвижных форм металлов, наиболее доступных для питания растений, и тем выше риск загрязнения в районах, располагающихся в непосредственной близости от источников выбросов.

Среди экспериментальных методов изучения влияния промышленных источников загрязнения на почвы следует особо отметить снегомерные съемки [17, 22]. Этот метод оказался очень эффективным и востребованным. Он широко используется при обследовании уровней загрязнения до настоящего времени, позволяет давать количественную оценку выпадений за значительный период времени и, что особенно важно, распределение выпадений загрязняющих веществ по пространству.

Одной из первых работ по оценке выпадений тяжелых металлов по результатам анализа снега можно назвать публикации Ю.С. Куклина и Л.Г. Коробейниковой [17], в которой авторы, оценивая выпадение ртути от отдельного промышленного источника, установили функциональную связь интенсивности выпадений (концентрации ртути в снеге) в зависимости от расстояния от источника выбросов. В работе Т.Н. Моршиной и К.А. Тимохович [22], снегомерная съемка была успешно использована для оценки выпадений фтористых соединений вокруг алюминиевого завода. Авторы установили тесную корреляционную связь концентраций фторидов в почвах и атмосферных выпадениях и зависимость от расстояния от источника выбросов.

Экспериментальные работы по оценке уровня загрязнения окружающей среды подкреплялись методами моделирования. Одной из первых работ по моделированию процессов выпадения загрязняющих веществ на почву является работа В.А. Борзилова и Н.Б. Сенилова [5]. В ней авторы предложили модель расчета выпадений консервативной примеси (аэрозольных частиц) от точечного промышленного источника на подстилающую поверхность. Модель учитывала конкретные метеоусловия и позволяла рассчитывать поле средних потоков на подстилающую поверхность от нескольких месяцев до нескольких лет. По мере

накопления и обобщения экспериментальных данных применимость этой модели была подтверждена для расчета среднего за большие периоды загрязнения почв вокруг промышленных источников [26].

В отличие от ТПП, основным источником загрязнения почв пестицидами является преднамеренное внесение этих токсичных соединений непосредственно в почву. Дальнейшая судьба токсикантов определяется миграцией и трансформацией внесенных токсичных соединений в самих почвах и их переходом в сопредельные среды (химическое разложение, сорбция на поверхности твердой фазы, испарение в воздух, перенос с подземными водами в водные объекты). Для описания поведения пестицидов в почвах использовались другие физико-математические модели.

Значительный импульс работам по изучению миграции и трансформации загрязняющих веществ 1970-х–1980-х гг. придал совместный советско-американский проект «Формы и пути миграции пестицидов и химикатов». Основная цель проекта – разработка прогностических моделей поведения пестицидов и химикатов в почве и воде. Институт экспериментальной метеорологии являлся головным по проекту с советской стороны. Эти работы проводились под руководством С.Г. Малахова (до 1982 г.) и В.А. Борзилова, в них активное участие принимали О.И. Возженников, И.В. Драголюбова, М.А. Новицкий, Л.С. Эрнестова (рис. 1).

Первый этап сотрудничества – взаимное знакомство с состоянием исследований в каждой стране – завершился в 1976 г. проведением симпозиума по проекту «Миграция и превращение пестицидов в окружающей среде». В рамках симпозиума были рассмотрены вопросы переноса и трансформации пестицидов в атмосфере, почве, водных системах, поступления и превращения пестицидов в растениях и животных, а также некоторые проблемы токсикологии пестицидов; обсуждались методы и результаты математического моделирования миграции пестицидов в окружающей природной среде [21].

Далее в рамках проекта исследования проводились по согласованным программам, целью которых являлась разработка и усовершенствование математических моделей, описывающих гидродинамические процессы и процессы трансформации и переноса пестицидов в системе почва-вода, установление зависимостей параметров моделей от характеристик окружающей



Рис. 1. Участники II советско-американского симпозиума «Прогнозирование поведения пестицидов в окружающей среде», Ереван, 1981 г. (первый ряд: третий слева – С.Г. Малахов, крайняя справа – Л.С. Эрнестова, второй справа – П.Е. Тулупов; второй ряд: пятая слева – Е.П. Вирченко, седьмой слева – В.М. Волощук, крайняя справа – И.В. Драголюбова)

среды, проверка моделей в лабораторных и полевых условиях. В дальнейших работах особое внимание было уделено выявлению роли составляющих природных вод в кинетику трансформации загрязняющих веществ, прогнозированию кинетики деградации пестицидов в почве, усовершенствованию моделей для прогнозирования поведения загрязняющих веществ в почве и воде. Часть соответствующей работы была проведена независимо в каждой стране, часть – во время взаимных визитов специалистов.

В основе имитационных моделей перераспределения и стока пестицидов и биогенных элементов с сельскохозяйственных угодий лежит полное гидрологическое описание сельскохозяйственного участка или водосбора, позволяющее получить поверхностный сток воды и твердых частиц, внутрипочвенный сток,

а также количество воды, просочившейся в грунтовые воды. На основании этих величин, используя изотермы сорбции, данные по растворимости и другие параметры получают требуемую информацию о выносе загрязняющих веществ и дают прогнозные оценки. Предложенная модель дала хорошие результаты для описания поведения пестицидов (ДДТ, γ -ГХЦГ, симазин и др.) [7, 30].

В серии работ, посвященных результатам советско-американского сотрудничества, следует отметить V Всесоюзное совещание «Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах», Обнинск, 12–15 января 1987 г. Этот форум явился значимым этапом, фактически обобщающим накопленный специалистами ИЭМ опыт в области мониторинга загрязнения окружающей среды с момента начала этих работ. В трудах были отражены результаты исследований, сгруппированные по семи основным направлениям:

- модели миграции и трансформации пестицидов в почве;
- вопросы нормирования загрязнения почв;
- миграция и трансформация пестицидов и удобрений в почве;
- поступление, миграция и трансформация промышленных загрязнений в почве;
- миграция и трансформация загрязняющих веществ в системе почва-растение, почва-вода;
- влияние загрязнений на свойства почвы;
- методы исследований и измерений.

На всех направлениях широко были представлены работы специалистов ИЭМ.

Разработкой методологии и исследованием механизмов процессов трансформации веществ в природных водах и в модельных растворах на основе кинетического подхода в ИЭМ занималась группа специалистов под руководством Л.С. Эрнестовой [29, 30]. На примере 3,4-дихлоранилина, метафоса, полихлорированных фенолов и ряда других загрязняющих веществ (ЗВ) была разработана методология изучения трансформации ЗВ в природных водах, в соответствии с которой скорость процесса представляется в виде аддитивной функции скоростей превращения вещества по нескольким, в первом приближении независимым механизмам. Эффективная константа скорости трансформации вещества в рамках каждого из механизмов может быть найдена на основе измерения отдельных кинетических,

физико-химических и гидрохимических параметров исследуемого вещества и факторов водной среды. Полученные по этой методике кинетические параметры апробированы в прогностических физико-математических моделях, описывающих поведение ЗВ в окружающей среде [6].

Были разработаны новые, имеющие авторскую защиту (А.с. № 1286995), высокочувствительные аналитические методы определения низких (микрограммы) концентраций компонентов природных вод, обладающих выраженными окислительно-восстановительными (редокс-) свойствами, кинетические методы определения сверхнизких стационарных концентраций синглетного кислорода и гидроксильных радикалов и их реакционной способности в отношении различных ЗВ. Подробная библиография по работам этого направления приведена в диссертациях Л.С. Эрнестовой и И.В. Семеновой [25, 29].

В результате проведенных исследований была установлена важная роль свободно-радикальных процессов трансформации органических ЗВ. Изучены механизмы каталитического и фотохимического инициирования супероксидных и гидроксильных свободных радикалов – продуктов активации кислорода и пероксида водорода. Количественно охарактеризован вклад фотохимических процессов в прямой и сенсibilизированный фотолиз органических ЗВ, а также в инициирование свободных радикалов [29].

Участие в расследовании различных экотоксикологических ситуаций на водных объектах России, в работах по оценке качества и экологического состояния территорий вокруг производственных объектов позволило провести апробацию разработанных методов на природных водных объектах различного типа с разной антропогенной нагрузкой. В этих работах активное участие принимали Г.В. Власова, И.В. Семенова. Были изучены пространственные, зональные и сезонные особенности распространения содержания гидроксильных радикалов и метастабильных редокс-компонентов при текущем состоянии природных водных экосистем и в случае возникновения в них критических экотоксикологических ситуаций [25, 29].

В результате проведенных работ была разработана новая система критериев и дана классификация экологического состояния природных водных экосистем на основе кинетических показателей (РД 52.18.24.83–89). При сравнительном анализе с

общепринятыми показателями и методами установлена информативность предложенных критериев для целей и задач экологического мониторинга, а также для выявления причин и прогноза критических экотоксикологических ситуаций [15, 29, 31].

Развитые в результате проведенных исследований группой Л.С. Эрнестовой представления о механизмах формирования состава и свойств природной водной среды как реакционной системы позволили разработать ряд новых способов воздействия на состав природной воды с целью улучшения ее потребительских свойств, которые прошли промышленную апробацию и внедрение. Способ стимулирования роста растений (А.с. № 704576) прошел промышленные испытания в тепличном комбинате г. Каунаса, отмечено повышение устойчивости овощных культур к болезням на ранних стадиях их развития и увеличение урожайности на 10–20 %. Способы выращивания личинок осетровых рыб (А.с. № 1112597, № 1157720) прошли крупные промышленные испытания и один из них был внедрен на Волгоградском осетровом заводе. Благодаря его применению в сезонах 1982–1985 гг. в условиях практически полной гибели личинок в производственных партиях дополнительно к принятой биотехнике получено и передано в пруды для подращивания около 10 млн штук личинок севрюги на стадии активного питания. Экономический эффект был оценен более чем в один млн рублей.

Среди работ по оценке перехода загрязняющих веществ в сопредельные среды можно назвать исследования Е.Ф. Ковнацкого и В.А. Сурнина по переходу тяжелых металлов, систематизированные в [32].

Интересный цикл работ по изучению поведения отравляющих веществ в окружающей среде был проведен Ю.И. Савиным и И.С. Халиковым. В качестве практического приложения этих работ можно назвать публикацию [28]. В ней приведены данные отбора проб воды и донных отложений в районах затопления химического оружия в Борнхольмском бассейне в ходе экспедиций 2006–2008 гг. и определения концентрации мышьяка методами рентгенофлюоресцентного анализа и инверсионной вольтамперометрии. Определены районы повышенного содержания мышьяка и их связь с мышьяксодержащими отравляющими веществами. Указано, что загрязнение мышьяком имеет локальный характер и не представляет в настоящее время опасности для природной среды.

К концу 1980-х – началу 1990-х гг. специалистами НПО «Тайфун»² совместно с отделом стандартизации НПО «Тайфун» (начальник – А.Ф. Ковалев) практически были решены вопросы обеспечения работ по мониторингу загрязнения почв нормативно-методическими документами (отраслевыми руководящими документами Росгидромета).

Под руководством Э.И. Бабкиной разработаны серия хроматографических методик выполнения измерений в почвах: хлорорганических пестицидов (РД 52.18.180–89), триазиновых гербицидов (РД 52.18.188–89), 2,4-Д (РД 52.18.264–90), гербицида далапон-натрия (РД 52.18.287–90), гербицида трихлорацетата натрия (РД 52.18.288–90), фосфорорганических пестицидов паратионметила, фозалона, диметоата (РД 52.18.310–92).

Профессором П.Е. Тулуповым и Л.И. Журавлевой разработана серия атомно-абсорбционных методик определения различных форм тяжелых металлов в почвах: кислоторастворимых (Cu, Zn, Pb, Ni, Cd) (РД 52.18.191–89), подвижных (Cu, Zn, Pb, Ni, Cd, Co, Cr, Mn) (РД 52.18.289–90), водорастворимых (Cu, Pb, Zn, Ni, Cd, Co, Cr, Mn) (РД 52.18.286–91).

Под руководством Т.Н. Моршиной разработана серия атомно-абсорбционных (с беспламенной атомизацией) методик определения в почвах и донных отложениях токсичных переходных металлов: мышьяка (РД 52.18.571–96), таллия (РД 52.18.573–96), сурьмы (РД 52.18.583–97).

Во второй половине 1980-х гг. под руководством профессора П.Е. Тулупова получило развитие еще одно направление – разработка хроматографических методик определения в атмосферном воздухе летучих органических соединений (ЛОС) и экспрессного группового рентгенофлуоресцентного метода определения тяжелых металлов (руководитель – В.А. Сурнин).

Признанным результатом работ в этом направлении было включение разработанных в НПО «Тайфун» хроматографических методик в «Руководство по контролю загрязнения атмосферы» (РД 52.04.186–89). Это были методики определения в атмосферном воздухе (далее в скобках указаны пункты РД): п. 5.3.1.1. Амины алифатические: метиламин, диметиламин, триметиламин, диэтиламин, триэтиламин (ГХ-метод) (М.А. Запевалов);

² ИЭМ включен в качестве головной структурной единицы в Научно-производственное объединение «Тайфун», созданное приказом Госкомгидромета от 25.09.1986 г. № 66.

п.5.3.5.2. Хлорированные углеводороды: четыреххлористый углерод, хлороформ, трихлорэтилен и тетрахлорэтилен и п.5.3.5.4. Хлоропрен (ГХ-метод) (Г.Г. Ждамиров, Н.Ф. Лапина); п.5.2.5.12. 15 химических элементов (рентгенофлуоресцентный метод с полупроводниковым детектором) (Н.Н. Бадовская, В.А. Сурнин).

Разработка методик определения ЛОС в атмосферном воздухе была направлена на решение конкретных задач и одновременно вносила вклад в развитие методической базы наблюдательной сети Росгидромета. Так, в рамках мероприятий по снижению уровней загрязнения атмосферного воздуха в районе музея-усадьбы «Ясная Поляна» (Тульская область) в короткие сроки по заданию Росгидромета были разработаны, аттестованы в ВНИИМ им. Менделеева и оформлены в виде руководящих документов новые методики анализа специфических для Щекинского промышленного узла примесей. Методики позволили провести обследования и в дальнейшем контролировать в атмосферном воздухе динил (смесь дифенила и дифенилоксида) РД 52.18.292–91 (П.Е. Тулупов, М.А. Запевалов, Н.Н. Лукьянова, Е.И. Рябинкина); метанол РД 52.18.302–91 (П.Е. Тулупов, М.А. Запевалов, Г.В. Кириченко), триметиламин РД 52.18.298–91 (П.Е. Тулупов, М.А. Запевалов, Т.Н. Ходаковская).

Еще одним актуальным направлением работ в этот период была разработка интегральных методов оценки уровней загрязнения окружающей среды, в частности почв. Инструментальные методы химического анализа позволяют получать надежную информацию о содержании различных токсикантов, но не позволяют однозначно оценивать степень и опасность загрязнения природных сред при наличии двух токсикантов и более. В этих случаях только удачно подобранные биотесты могут дать обоснованную информацию о состоянии загрязнения окружающей среды или замкнутого пространства жизнеобитания.

П.Е. Тулупов и Н.Ф. Лапина исследовали экспрессный метод биотестирования, основанный на ростовых свойствах отрезков колеоптилей, зависящих от содержания токсичных веществ в тестируемых объектах (почве, донных отложениях, водных растворах) [27]. Сущность метода основана на оценке роста трехсуточных этиолированных проростков генетически однородного сорта злаковых культур в зоне растяжения. Многочисленные лабораторные и натурные

исследования позволили установить строгую функциональную связь между токсическим воздействием и величиной прироста. Это позволило найденную биологическую активность компонентов (суммарное загрязнение) среды (суммарное загрязнение любой среды) количественно выражать в общепринятых единицах гигиенического нормирования (например, ПДК определенного вещества). Результатом работы стал нормативный документ Росгидромета по количественной оценке интегрального уровня загрязнения почвы техногенных районов методом биотестирования (РД 52.18.344–93).

Определенным итогом методического обеспечения работ по мониторингу химического загрязнения окружающей среды стал нормативный документ РД 52.18.595–96 «Федеральный перечень методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды». Документ действует до настоящего времени и играет важную роль в обеспечении единства измерений на государственной сети мониторинга загрязнения окружающей среды. Соблюдение требований этого документа является обязательным при получении всеми заявителями лицензии Росгидромета на выполнение работ в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды. В него вошли все аттестованные методики измерений, разработанные специалистами НПО «Тайфун» в области мониторинга загрязнения окружающей среды.

Анализируя изложенные выше результаты, можно с уверенностью сказать, что 1980-е годы явились периодом наивысшего развития работ по созданию научно-методических основ мониторинга загрязнения почв. Заложенные в этот период методологическая и методическая база позволили развиваться объединению в ситуации отсутствия четких государственных ориентиров и сохранить природоохранное направление в период сложной социально-экономической ситуации в России 1990-х – начала 2000-х гг. В указанный период, несмотря на трудности, ведущие сотрудники НПО «Тайфун» продолжали участвовать в создании нормативной базы функционирования государственной наблюдательной сети Росгидромета.

Так, были разработаны два основополагающих нормативных документа по мониторингу загрязнения почв, регламентирующие правила функционирования наблюдательной сети Росгидромета:

– РД 52.18.697–2007 «Наблюдения за остаточным количеством пестицидов в объектах окружающей среды. Организация и порядок проведения» (Н.Н. Лукьянова, Э.И. Бабкина, Ж.Н. Трублаевич), устанавливающий общие требования к организации и порядку проведения режимных и специальных наблюдений за остаточным количеством (ОК) пестицидов и основных токсичных продуктов их разложения в почве, поверхностных водах и донных отложениях при вторичном загрязнении поступающими из почвы ОК пестицидов;

– РД 52.18.718–2008 «Организация и порядок проведения наблюдений за загрязнением почв токсикантами промышленного происхождения» (Л.В. Сатаева, Г.В. Власова), устанавливающий требования к организации и порядку наблюдений за загрязнением почв токсикантами промышленного происхождения (ТПП): тяжелыми металлами (ТМ), мышьяком, фтором, нефтью и нефтепродуктами (НП), нитратами, сульфатами, поступающими на почву из точечных, рассеянных и неточечных источников, и при аварийном разливе НП на почву.

Полученные с государственной наблюдательной сети Росгидромета данные обобщаются в НПО «Тайфун» в виде ежегодных обзоров «Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения» (руководитель – Л.В. Сатаева) и «Мониторинг пестицидов в объектах природной среды Российской Федерации» (руководитель – Н.Н. Лукьянова).

По направлению мониторинга содержания бенз(а)пирена и тяжелых металлов в атмосферном воздухе городов России НПО «Тайфун» осуществляет научно-методическое руководство работами сети (в части отбора и анализа проб) и одновременно выступает в роли центральной лаборатории, выполняющей измерения проб, отобранных в более чем ста городах по всей территории Российской Федерации.

Результаты мониторинга бенз(а)пирена и тяжелых металлов обобщаются в виде справок для ежегодных обзоров ГГО «Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России» (руководитель – В.А. Сурнин).

В период сложной социально-экономической ситуации конца 1980-х – начала 2000-х гг. функционирование НИУ Росгидромета было подчинено основной цели – сохранение научно-го и материально-технического потенциала, накопленного за предыдущие годы. Для направления мониторинга загрязнения

о окружающей среды это означало выход на смежные области природоохранной деятельности. Фактически это означало поиск практических приложений в деятельности – выполнение целевых работ по оценке уровней загрязнения в конкретных районах на конкретные результаты.

Мониторинг стойких органических загрязнителей (СОЗ)

В конце 1980-х – начале 1990-х гг. в НПО «Тайфун» начало быстро развиваться новое научное направление, связанное с анализом следовых концентраций высокотоксичных загрязняющих веществ в окружающей среде. С этой целью был организован Центр прецизионных измерений, оснащенный комплексом современного оборудования, включая новейшие на тот период времени хромато-масс-спектрометры, газовые и жидкостные хроматографы, атомно-абсорбционные и ИСП-спектрофотометры, мобильные средства отбора и анализа проб.

Руководство вновь созданного направления было поручено проверенным кадрам – начальником нового отдела был назначен С.Г. Малахов. Учитывая потребность в квалифицированных кадрах, прошел набор специалистов из соседних НИИ Обнинска. Среди вновь принятых сотрудников ИЭМ, активно принимавших участие в создании нового направления, следует назвать В.В. Егорова, В.П. Кирихина, А.В. Митрошкова, В.Д. Помещикова, Д.П. Самсонова, Т.В. Рахманову, Р.И. Первунину, С.П. Беляева, С.Л. Добрецова. За короткое время центр стал широко известен в нашей стране и за рубежом и стал одной из трех химических лабораторий в России, аккредитованных на анализ следовых концентраций высокотоксичных полихлорированных dibenzodioxin и dibenzofuran (ПХДД/ПХДФ) в объектах окружающей среды, включая биообъекты.

В конце 1990-х гг. центр активно включился в международные программы по мониторингу стойких органических загрязнителей (СОЗ). Практически одновременно с принятием международной Стокгольмской конвенции по СОЗ Росгидромет издал приказ, в котором НПО «Тайфун» был определен головной организацией Росгидромета в области мониторинга СОЗ (воздух, поверхностные воды, осадки, почвы)³.

³ Приказ Росгидромета № 46 от 03.04.2001 г. «Об организации работ в области мониторинга стойких органических загрязняющих веществ».

К сожалению, Стокгольмскую конвенцию в Российской Федерации ждала непростая судьба: ее подписали в 2004 году, ратифицировали в 2011 году, а План выполнения Стокгольмской конвенции Правительство РФ утвердило только в 2017 году. Несмотря на это, методические основы мониторинга CO₂, заложенные в 1990-х гг., позволяют и в настоящее время успешно конкурировать на внутреннем и внешнем рынке услуг по анализу широкого спектра CO₂.

Мониторинг CO₂ и ртути в Арктике. Одним из наиболее актуальных и успешных направлений исследований НПО «Тайфун», результаты которого признаны на международном уровне, являются работы по мониторингу CO₂ в Арктике.

Особенности атмосферной циркуляции способствуют глобальному переносу и накоплению CO₂ из средних широт в высокие. Этот эффект был описан в начале 1960-х годов и получил название «глобальная дистилляция», или эффект «прыгающего кузнечика». Эффект «прыгающего кузнечика» возникает только в том случае, когда вещество устойчиво к деградации в течение длительного времени, что и свойственно CO₂. Если вещество попадает в регион, где всегда холодно, как в Арктике и Антарктике, оно там и остается, закрепляясь в конденсированной форме. Благодаря своей низкой растворимости в воде и высокой растворимости в жирах, CO₂ накапливаются в богатых жирами арктических пищевых цепях. Животные высших трофических уровней являются основой традиционного питания для коренных народов Арктики. В результате некоторые общины коренного населения Арктики относятся к одним из наиболее подверженных воздействию CO₂ групп населения Земли.

Атмосферный воздух – наиболее важная среда, по которой в основном происходит перенос CO₂ в Арктику, поэтому приоритетное значение имеет мониторинг содержания CO₂ в атмосферном воздухе. Работы по мониторингу CO₂ в атмосферном воздухе начались в 1990-х годах в рамках международной программы мониторинга и оценки Арктики (АМАП) в сотрудничестве с канадскими исследователями под руководством д-ра биол. наук. А.В. Коноплева.

В Российской Федерации мониторинг фоновых районов Арктики в разные годы проводился в трех точках – на станции Дунай в районе Тикси (1993–1994 гг.) в дельте р. Лена, пос. Амдерма

(1999–2001 гг.) на побережье Карского моря на Арктической границе между Европой и Азией и на полярной станции Валькаркай (2002–2003 и 2008–2010 гг.) в 50 км от г. Певек на побережье Восточно-Сибирского моря Чукотского полуострова. В 2010 г. на гидрометобсерватории Тикси также начата программа по отбору проб воздуха на содержание широкого спектра CO₂.

Для сопоставимости получаемых результатов с данными сети арктических станций мониторинга в Канаде и Норвегии на российских станциях мониторинга использовались методы отбора проб и их анализа, принятые в международной практике. Отбор проб проводится еженедельно, при этом общий объем прокаченного воздуха составляет несколько десятков тысяч кубометров. Установка отбора проб (рис. 2) позволяет проводить отдельный отбор аэрозольной и газовой фракций CO₂: твердые частицы оседают на фильтре из стекловолокна, газовая фракция – на двух слоях полиуретанового фильтра, расположенных непосредственно за аэрозольным фильтром [14, 16].

Сравнительный анализ распределения концентраций конгенеров ПХБ на станциях мониторинга CO₂ в Валькаркае и Амдерме показал, что на основе полученных данных достаточно надежно можно понимать, являются ли наблюдаемые уровни следствием глобального переноса либо обусловлены влиянием местных (локальных) источников загрязнения.

Следует подчеркнуть, что данные по мониторингу воздуха в Российской Арктике являются уникальными и наблюдения должны продолжаться. В последнее время (2015–2017 гг.)



Рис. 2. Специалисты НПО «Тайфун» проводят отбор проб CO₂ в атмосферном воздухе на станции в Арктике

наблюдения на двух станциях: пос. Амдерме и пос. Тикси были возобновлены в рамках контракта с АМАР. Анализ всех отобранных проб проводится на современном оборудовании квалифицированными специалистами (руководитель – Д.П. Самсонов, ведущие специалисты – А.И. Кочетков, Е.М. Пасынкова).

Еще одним приоритетным объектом мониторинга СОЗ являются биологические объекты, в частности кровь населения, проживающего в районах Крайнего Севера. Коренные народы Севера оказываются под воздействием СОЗ, производимых в индустриально развитых регионах Земли (Северной Америки, Западной Европы, Юго-Восточной Азии). Благодаря своей низкой растворимости в воде и высокой растворимости в жирах СОЗ накапливаются в богатых жирами арктических пищевых цепях. В свою очередь животные высших трофических уровней являются основой традиционного питания для коренных народов Арктики.

Работы по мониторингу СОЗ в крови населения российской Арктики проводились в рамках проекта ГЭФ «Стойкие загрязняющие вещества, питание и здоровье коренных народов Российского Севера» (руководитель – А.В. Коноплев). Наивысшие нагрузки по СОЗ и связанный с ними риск для здоровья были установлены в прибрежных районах Чукотки, где традиционный рацион питания основан на рыбе и морских млекопитающих.

Полученные результаты были обобщены в отчете АМАР [33] и являются крайне важными для понимания особенностей воздействия СОЗ на критические группы населения Российской Арктики, имея в виду ускоренное освоение этого региона в современный период.

Помимо СОЗ к приоритетным загрязнителям в Арктике относится ртуть. Элементарная ртуть может длительное время находиться в атмосфере, и это приводит к ее распространению по всему Северному полушарию.

Работы по мониторингу ртути в Арктике проводились параллельно с работами по мониторингу СОЗ в 2002–2009 гг. (с небольшими перерывами). Наблюдаемые концентрации элементарной ртути в приземном воздухе в районе пос. Амдерма соответствовали глобальным фоновым уровням для арктических регионов. Максимальные концентрации паров ртути наблюдаются в летние месяцы (июле-августе), что подтверждает эффект уменьшения содержания ртути

и в атмосфере Российской Арктики (так называемое явление «истощения» атмосферной ртути) (atmospheric mercury depletion event – AMDE) [15].

Участие в реализации федеральных целевых программ (после 2000 года)

В середине 2000-х годов экономическая ситуация в Российской Федерации стабилизировалась, что дало возможность государству реализовать крупные проекты, имеющие значительную природоохранную составляющую. В рамках реализации установленных полномочий Росгидромета НПО «Тайфун» активно принимало участие в реализации нескольких федеральных целевых программ. При их реализации в значительной степени были востребованы опыт и знания, накопленные в период бурного развития работ в 1970–1980-х гг.

Уничтожение химического оружия. В 2000-х годах НПО «Тайфун» Росгидромета участвовало в работе по нормативно-методическому и организационному обеспечению работ системы государственного контроля и мониторинга (СГЭКиМ ОС) на предприятиях по уничтожению химического оружия (В.Г. Булгаков, К.И. Васильева, Н.Н. Лукьянова). Регулярно проводился анализ и обобщение данных мониторинга в районах размещения объектов по уничтожению на основе разработанных рекомендаций по проведению наблюдению; по оценке влияния деятельности объектов по уничтожению ХО на загрязненность компонентов природной среды; по оценке качества компонентов природной среды в зонах защитных мероприятий в соответствии с требованиями Росгидромета [8].

Российско-китайский мониторинг трансграничных водных объектов. В период 2006–2017 гг. одним из длительных и успешных проектов, в котором принимали участие специалисты НПО «Тайфун» (М.А. Запевалов, Н.Н. Лукьянова, И.В. Семенова), был проект по проведению российско-китайского мониторинга трансграничных вод [13]. Уникальность этого проекта состояла в том, что стороны практически разработали методологию проведения совместных работ, корректного представления результатов, контроля качества аналитических работ. Ежегодно по результатам мониторинга на совместном заседании рабочих групп принимались согласованные оценки

динамики качества вод бассейна р. Амур и непосредственно передавались органам федеральной и региональных властей. Полученный опыт не имеет аналогов в мире и его целесообразно тиражировать и распространять на другие трансграничные водные объекты в рамках двустороннего и международного сотрудничества.

Система экологического мониторинга СОЧИ-2014.

В 2009 году Росгидромет поручил НПО «Тайфун» выполнение работ по мероприятию 215 Программы «Создание системы комплексного экологического мониторинга загрязнения окружающей среды в период подготовки и проведения XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года».

Работы по созданию и внедрению системы комплексного экологического мониторинга окружающей среды, в ходе которых были выполнены неоднократные экспедиционные обследования территории, определен перечень вредных загрязняющих веществ, требующих постоянного контроля в воздухе, воде и почве, начались уже в 2008 году. Была разработана концепция и подробные технические регламенты элементов системы, отвечающей современным научно-техническим достижениям и требованиям [24].

Комплексный характер системы экологического мониторинга (СКЭМ) предполагал, что в ее рамках должны проводиться оперативные наблюдения за качеством атмосферного воздуха (с использованием автоматических станций), поверхностных и морских вод, почвы и растительности по приоритетным загрязняющим веществам как на фоновом, так и на локальном и территориальном уровнях. Кроме того, объектами комплексного мониторинга должны быть редкие и исчезающие виды животных и растений, обитающие в Сочинском национальном парке.

Для обеспечения функционирования СКЭМ на базе СЦГМС ЧАМ была организована отдельная лаборатория, проведено ее оснащение современным пробоотборным и аналитическим оборудованием. Непосредственно в период проведения соревнований лаборатория работала в круглосуточном режиме, для экстренных выездов в режиме постоянной готовности находились две мобильные лаборатории, готовые выехать по первому сигналу. Как известно, Олимпийские игры Сочи-2014 прошли без инцидентов, в этом была и заслуга сотрудников НПО «Тайфун» (рис. 3).



Рис. 3. Группа специалистов НПО «Тайфун» во главе с генеральным директором В.М. Шершаковым в период проведения XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года.

Мониторинг уникальной экологической системы озера Байкал. Основы мониторинга экологической системы озера Байкал были заложены в НПО «Тайфун» в 1980-е годы. Совместно с лабораторией фоновое мониторинга (ЛАМ, г. Москва) был организован ряд экспедиций по изучению источников поступления и тенденций изменения концентраций хлорорганических соединений (ХОС) (пестициды, полихлорированные бифенилы) в объектах природной среды и биообъектах озера Байкал [3, 4].

На основании полученных данных было установлено, что загрязнение природной среды этого района связано в основном с глобальным переносом ХОС, но при этом необходимо учитывать также и региональные источники выбросов. Особые физико-географические условия экологической системы озера Байкал – низкая температура воды (в слое 0–300 м в августе – 9–12 °С, а глубже и до дна – 3,2–3,8 °С), большой объем

озера (23,1 тыс. км³), малый водообмен – способствуют накоплению токсикантов в трофических цепях. Например, несмотря на фоновые уровни концентраций в воде озера Байкал, в жире байкальских тюленей происходит концентрирование ПХБ ДДТ в несколько десятков тысяч раз, и в результате их содержание весьма высоко [3, 4].

Работы по мониторингу уникальной экологической системы озера Байкал нашли продолжение в последние годы на современном техническом уровне в рамках выполнения ФЦП «Охрана озера Байкал и социально-экономическое развитие Байкальской природной территории на 2012–2020 годы» (рис. 4). Под руководством Д.П. Самсонова получены данные на основе единого и наиболее современного аналитического метода – хромато-масс-спектрометрии высокого разрешения с изотопным разбавлением, что позволяет проводить корректные сравнения содержания СОЗ в различных объектах окружающей среды и делать выводы не только об уровнях загрязнения, но и миграции СОЗ между средами [23].



Рис. 4. Отбор проб почвы и растений на БПТ

Наряду с традиционными видами СОЗ был выделен и идентифицирован ряд токсикантов, не попадавших ранее в поле внимания исследователей, получены данные по глобальному атмосферному переносу ряда СОЗ, не применявшихся на территории РФ, получены сведения о содержании и распределении СОЗ по глубинам озера (рис. 5). Особое внимание уделено анализу СОЗ в биообъектах, накапливающих токсиканты в ходе жизнедеятельности, при этом впервые максимально полно рассматривались элементы биосистемы – зоо- и фитопланктон, губки, водоросли, ракообразные и разные виды рыб [23].

Обзор наиболее важных и интересных результатов исследований по направлению мониторинга загрязнения окружающей среды за прошедшие 60 лет показывает, что накопленный потенциал позволяет уверенно смотреть в будущее.

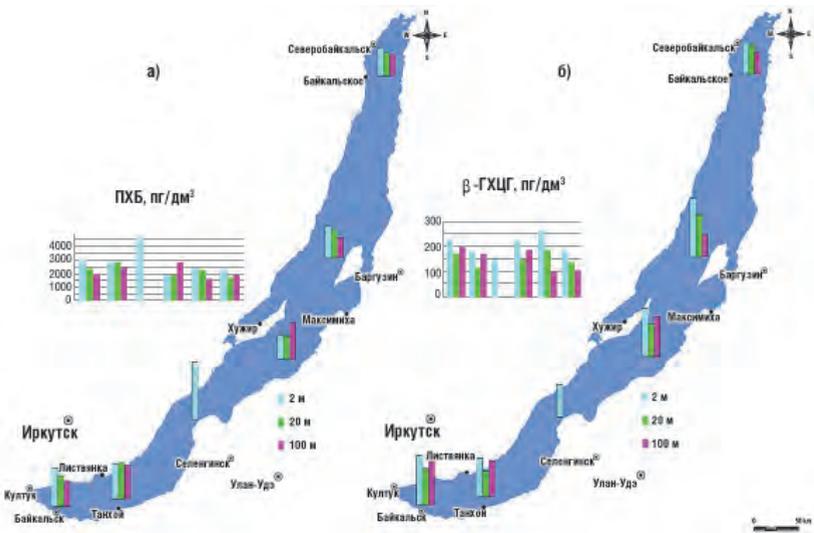


Рис. 5. Распределение содержания ХОС в воде озера Байкал по глубине [23]

Список литературы

1. Бобовникова Ц.И., Бабкина Э.И., Миронюк Г.В., Егоров В.В. Определение хлорорганических пестицидов и их метаболитов в почве // Труды ИЭМ. 1977. Вып. 7 (76). С. 127–131.
2. Бобовникова Ц.И., Вирченко Е.П., Дибцева А.В., Вертинский Ю.К. Содержание ДДТ и его метаболитов в почвах Азербайджанской ССР // Труды ИЭМ. 1981. Вып. 5 (63). С. 80–83.
3. Бобовникова Ц.И., Дибцева А.В. Хлорорганические соединения (ХОС) в экосистеме оз. Байкал // Труды совещания «Байкал как природная лаборатория для исследования глобальных изменений окружающей среды и климата», 11–17 мая 1994 г. Иркутск: Изд-во «Лисна», 1994. Т. 8. С. 17.
4. Бобовникова Ц.И., Сурнин В.А., Алексеева Л.Б., Грошева Е.И. Загрязнение биоты оз. Байкал хлорорганическими токсикантами. Диоксины супертоксианты XXI века // Инф. вып. № 6. М., 2001. С. 44–53.
5. Борзилов В.А., Сенилов Н.Б. Модель выпадения загрязняющих веществ промышленного происхождения на почву // Труды ИЭМ. 1977. Вып. 7(76). С. 26–35.
6. Борзилов В.А., Троянова Н.Н., Эрнестова Л.С. и др. Моделирование поведения остатков гербицидов в водных экосистемах (на примере 3,4-ДХА). Прогнозирование поведения пестицидов в окружающей среде // Труды II советско-американского симпозиума. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 245 с.
7. Борзилов В.А., Драголюбова И.В. Модель поведения химикатов в верхнем слое почвы. Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах // Труды V Всесоюзного совещания, Обнинск, 12–15 января 1987 г. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. С. 5–12.
8. Булгаков В.Г., Чупис В.Н., Васильева К.И., Лукьянова Н.Н., Косях И.В., Лунева К.В. Состояние атмосферного воздуха, поверхностных вод, почвы в зонах защитных мероприятий объектов по уничтожению химического оружия (исследования 2008–2009 гг.) // Российский химический журнал. 2010. Том LIV, № 4. С. 88–94.
9. Вертинская Г.К., Малахов С.Г., Махонько Э.П. Методика отбора проб почвы при контроле загрязнения окружающей среды металлами // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 11(97). С. 94–99.
10. Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв. Часть I. Под ред. канд. физ.-мат. наук С.Г. Малахова. М.: Московское отделение Гидрометеоиздата, 1983. 128 с. (Репринт публикации на с. 349–380.)
11. Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв. Часть II. Под ред. канд. физ.-мат. наук С.Г. Малахова. М.: Московское отделение Гидрометеоиздата, 1984. 61 с.
12. Жигаловская Т.Н., Махонько Э.П., Шилина А.И., Егоров В.В., Малахов С.Г., Первунина Р.И. Микроэлементы в природных водах и

атмосфере // Труды ИЭМ. 1974. Вып. 2(41). 184 с. (Репринт публикации на с. 381–401.)

13. Запевалов М.А., Дугина И.О., Иванова Е.Г., Семькина Г.И., Журавлева Ю.А., Ковшик О.В. Российско-китайский мониторинг качества вод трансграничных водных объектов бассейна р. Амур // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод. Ч.1. Материалы научной конференции (с международным участием) 8–10 сентября 2015 г. Ростов-на-Дону, 2015. С. 297–300.

14. Коноплев А.В., Никитин В.А., Самсонов Д.П., Черник Г.В., Рычков А.М. Полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды в атмосфере дальневосточной российской Арктики // Метеорология и гидрология. 2005. № 7. С. 38–44.

15. Коноплев А.В., Панкратов Ф.Ф., Рычков А.М. Уменьшение концентрации ртути в атмосфере Российской Арктики весной // Метеорология и гидрология. 2005. № 9. С. 50–54.

16. Коноплев А.В., Волкова Е.Ф., Кочетков А.И., Первунина Р.И., Самсонов Д.П. Мониторинг стойких органических загрязнителей в атмосферном воздухе как элемент выполнения Стокгольмской конвенции о стойких органических загрязнителях // Химическая физика. 2012. Т. 31, № 10. С. 1–8.

17. Куклин Ю.С., Коробейникова Л.Г. Оценка выпадений ртути от отдельного промышленного источника по результатам анализа снега // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 9(82). С. 26–28.

18. Махонько Э.П., Первунина Р.И., Вертинская Г.К., Жигаловская Т.Н., Малахов С.Г. О загрязнении почв промышленных районов тяжёлыми металлами // Труды ИЭМ. 1976. Вып. 4(56). С. 109–122.

19. Махонько Э.П., Малахов С.Г., Вертинская Г.К., Блинов Б.К., Неспятина Т.В. Плотность выпадения металлов на подстилающую поверхность вокруг предприятий черной и цветной металлургии и ГРЭС // Труды ИЭМ. 1981. Вып. 5(63). С. 41–49.

20. Махонько Э.П., Малахов С.Г., Вертинская Г.К. Опыт исследования загрязнения почв металлами вокруг металлургических предприятий // Труды ИЭМ. 1985. Вып. 11(97). С. 50–59.

21. Миграция и превращения пестицидов в окружающей среде // Труды советско-американского симпозиума. Тбилиси, октябрь 1976. Под ред. С.Г. Малахова, В.А. Борзилова. М.: Московское отделение Гидрометеоздата, 1976. 149 с.

22. Моршина Т.Н., Тимохович К.А. Формы выпадений фтористых соединений вокруг алюминиевого завода // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 9(82). С. 26–28.

23. Самсонов Д.П., Кочетков А.И., Пасынкова Е.М., Запевалов М.А. Содержание стойких органических загрязнителей в компонентах уникальной экологической системы оз. Байкал // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 105–115.

24. Сарычев С.А., Дудина Л.И., Запевалов М.А., Косых В.С., Нечаев Д.Р., Полетаева Н.Н., Семенова И.В. Любимцев А.Л. Система комплексного экологического мониторинга Сочи-2014 // Метеорология и гидрология. 2015. № 8. С. 78–87.

25. Семенова И.В. Разработка методов определения и изучения роли продуктов активации биохимического цикла кислорода в природных водных экосистемах: Автореф. дис. канд. биол. наук. Калуга, 1998. 29 с.

26. Сенилов Н.Б., Малахов С.Г., Махонько Э.П., Сатаева Л.В. и др. Сравнение моделей расчета загрязнения почв от промышленных источников с экспериментальными данными. Миграция загрязняющих веществ в почвах и сопредельных средах // Труды V Всесоюзного совещания, Обнинск, 12–15 января 1987 г. Ленинград: Гидрометеоиздат, 1989. С. 5–12.

27. Тулупов П.Е., Лапина Н.Ф., Ласточкина Д.А., Калинина И.Е. Отрезки колеоптилей – новый интегральный биотест для оценки степени загрязнения природных сред. Загрязнение атмосферы и почвы // Труды IV Всесоюзного совещания, Обнинск, май 1989 г. М.: Московское отделение Гидрометеоиздата, 1991. С. 41–51.

28. Халиков И.С., Савин Ю.И. Содержание мышьяка в воде и донных отложениях в районах затопления химического оружия Борнхольмского бассейна Балтийского моря // Метеорология и гидрология. 2011. № 5. С. 43–55.

29. Эрнестова Л.С. Методология и методика изучения состояния водных экосистем на основе кинетического подхода: Автореф. дис. д-ра хим. наук. Обнинск, 1995. 58 с.

30. Эрнестова Л.С., Скурлатов Ю.И., Шпотова Т.Б., Штамм Е.В. Методологические подходы к исследованию кинетики химической трансформации загрязняющих веществ в природных водах // Труды ИЭМ. 1982. Вып. 12(98). С. 84–104.

31. Эрнестова Л.С., Власова Г.В., Семенова И.В. Комплексные показатели экологического нормирования антропогенного воздействия на природные водные объекты // Метеорология и гидрология. 1990. № 9. С. 106–116.

32. Evgeny F. Kovnatsky, Valery A. Surnin. Utilization of vegetation sample banks as an indicator of environmental state in the areas of industrial pollution // The Science of the Total Environment. 1993. Vol. 139/140. P. 271–277.

33. Knoplev A., Pervunina R., Samsonov D. PTS levels in humans. Persistent toxic substances, food security and indigenous peoples of the Russian North. Final report. AMAP, Oslo 2004. Chapter 7, P. 130–151. [Электронный ресурс]. <https://www.amap.no/documents/doc/persistent-toxic-substances-food-security-and-indigenous-peoples-of-the-russian-north.-final-report/795>.



ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ И АВТОМАТИЗАЦИИ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Г.Ф. Яскевич

Разработка методов и средств контроля объектов окружающей среды с момента создания Института экспериментальной метеорологии (ИЭМ), а в дальнейшем – НПО «Тайфун» являлась весьма важным направлением работ, практически, во всех подразделениях объединения. Развитие закрепленных за ИЭМ и НПО «Тайфун» ключевых направлений исследований обусловило необходимость постоянного совершенствования и развития инструментально-методической базы эксперимента, основы которой в ИЭМ заложили В.В. Смирнов, В.И. Смирнов и М.А. Алленов.

Благодаря создаваемым приборам для измерений параметров окружающей среды наиболее важные результаты исследований, полученных в подразделениях объединения, как правило, базировались на данных экспериментов, проводимых как в натуральных условиях, так и на созданных для этих целей крупногабаритных лабораторных установках НПО «Тайфун», оснащенных самыми передовыми технологиями моделирования и контроля процессов в атмосфере.

С появлением новых знаний, формулировкой новых задач изменялись структура, состав и информационно-аналитические характеристики приборов и методов измерений исследуемых характеристик объектов окружающей среды. И если на первых этапах становления объединения (с учетом конкретных задач и существовавшего уровня развития средств автоматики и вычислительной техники) акцентировалось внимание в основном на применении и разработке приборов исследовательского класса, предполагающих безусловное присутствие оператора для каждого прибора в процессе экспериментов, то в дальнейшем, с появлением задач непрерывного мониторинга, существенно возросли требования к уровню автоматизации исследований и научного эксперимента.

Динамика эволюции технических средств контроля природной среды в той или иной степени отражена (параллельно с развитием научных направлений объединения) во всех статьях предлагаемого сборника. В настоящем кратком обзоре основное внимание уделено опубликованным в трудах ИЭМ разработкам, имеющим оригинальный либо «пионерский» характер и широкие перспективы дальнейшего развития.

Прежде всего это относится к приборам и методам контроля газового состава атмосферы, параметров облаков (включая тип и балльность облачности), туманов и в целом атмосферных аэрозолей. Развитие каждого из названных направлений неразрывно связано с развитием и совершенствованием средств автоматизации процессов измерений, поэтому эти вопросы будут рассматриваться параллельно. Отдельно представлены достижения НПО «Тайфун» в области автоматизации научного эксперимента, являющейся неотъемлемой частью развития технических средств контроля объектов окружающей среды и всех ключевых направлений исследований, закрепленных за объединением.

Основные технологии мониторинга природной среды ИЭМ и НПО «Тайфун», обсуждающиеся в статье

В настоящем обзоре рассматриваются:

- «контактные» технологии контроля микрофизических и оптических характеристик аэрозольной компоненты атмосферы:
 - фотоэлектрические счетчики частиц;
 - анализаторы аэрозолей телевизионные;
- дистанционные методы и средства мониторинга параметров природной среды:
 - лидары;
 - спектрофотометры;
 - радиометры;
- общие вопросы развития автоматизации научного эксперимента.

По каждому из перечисленных выше направлений ниже обсуждаются этапы зарождения, становления, проблемы и перспективы развития, кратко – наиболее значимые научные результаты, полученные в объединении с применением ключевых технологий контроля параметров природной среды.

«Контактные» технологии контроля микрофизических и оптических характеристик аэрозольной компоненты атмосферы

Атмосферные аэрозоли в целом, включая облака, туманы, а также иные аэрозольные компоненты атмосферы (в том числе, например, черный углерод), участвуют в процессах как «обусловливающих, так и обусловленных глобальным и региональным изменением климата». В этой связи изучение условий их возникновения, эволюции, а также мониторинг характеристик являлись с момента организации как ИЭМ, так и НПО «Тайфун» весьма актуальной задачей геофизических исследований и наблюдений в натурных и модельных условиях.

Первые «контактные» технологии контроля микроструктуры аэрозолей атмосферы, под которыми в дальнейшем будем подразумевать методы и средства измерения параметров частиц в воздухе, предполагающие непосредственный контакт датчиков приборов с контролируемой средой, разработаны в ИЭМ на рубеже 60–70 годов двадцатого века [1]. Инструментальным воплощением таких

технологий стали фотоэлектрические счетчики частиц (ФЭС). Их создание диктовалось необходимостью экспериментальной проверки, подтверждения либо уточнения теоретических разработок, направленных на создание физико-математических основ формирования и эволюции облачных сред в атмосфере, а также активных воздействий на процессы облакообразования.

Как и во всем мире, развитие и совершенствование ФЭС в НПО «Тайфун» шло в направлении расширения диапазонов размеров и концентраций измеряемых частиц, повышения степени автоматизации процесса измерений, а также снижения их погрешностей. Были разработаны приборы, предназначенные для измерения как модельных, так и естественных (самолетные ФЭС) облачных образований. Модельные облачные среды, формируемые в крупногабаритных, объемом до 3000 м³, облачных камерах ИЭМ позволяли детально исследовать физические процессы зарождения и эволюции облаков в строго контролируемых метеорологических условиях, в значительной мере приближенных к реальным условиям атмосферы. Получаемые экспериментальные данные могли служить базой для корректировки и уточнения теоретических моделей зарождения и эволюции реальных облачных образований. Самолетные ФЭС давали возможность измерения микроструктуры различных типов и на разных по высоте уровнях естественных облаков.

Большой вклад в развитие и совершенствование ФЭС, предназначенных для исследования модельных аэрозольных сред, внес В.В. Смирнов. Понимая важность экспериментальных данных, получаемых в контролируемых условиях крупногабаритных модельных установок НПО «Тайфун» для исследования физики облаков и разработки эффективных методов и средств активных воздействий, В.В. Смирнов стремился в максимальной степени реализовать возможности ФЭС по измерению параметров аэродисперсных сред. На основе мирового и собственного опыта по созданию подобного типа приборов, а также достижений в оптико-электронном приборостроении и теории рассеяния света им и с его участием создан ряд оригинальных моделей ФЭС, характеристики которых находились на уровне мировых достижений [19]. (Репринт работы приведен на с. 402–416.)

Для более полного представления об особенностях работы приборов испытания большинства своих разработок В.В. Смирнов проводил лично.

Значительный вклад в совершенствование подобного вида техники внес Н.П. Романов [18]. Его усилия были направлены в основном на оптимизацию оптических схем ФЭС, вывод соотношений для расчета рабочих характеристик счетчиков, реализующих различные схемы освещения и регистрации рассеянного исследуемыми частицами излучения, решение проблем калибровки приборов. Отработкой конструкций различного типа ФЭС длительное время занимался Н.В. Гончаров.

В результате усилий ученых и специалистов ИЭМ эксперименты, проводимые в натурных и модельных условиях с применением разработанных в объединении различных моделей ФЭС, в целом показали удовлетворительное качественное согласие с результатами расчетов по теоретическим моделям образования и эволюции облаков. С помощью самолетных ФЭС впервые в СССР получены экспериментальные данные о микроструктуре различного типа теплых облаков на разных стадиях их формирования.

Тем не менее ФЭС остаются приборами, реализующими косвенный принцип измерений, при котором данные о значениях конечного параметра (в частности размеров частиц) получают путем измерения одного или нескольких промежуточных показателей (например амплитуды электрического импульса). Связь между этими параметрами имеет неоднозначный характер



Экспедиция Городец, 2007 год. В.В. Смирнов на натурных испытаниях своих разработок

и, кроме того, существенным образом зависит от многих иных (как правило неизвестных) характеристик частиц (форма, показатель преломления материала частицы и т. д.). По этой причине результаты измерений аэрозолей с помощью ФЭС могут иметь широкое поле для интерпретации. Остаются также серьезные проблемы с экспериментальными исследованиями начальных стадий конденсации облачных частиц, оценкой роли и значений коэффициента конденсации при различных начальных условиях зарождения и эволюции облака и т.д.

Кроме того, в силу самого принципа действия ФЭС оказываются практически не пригодными для измерения микроструктуры облаков, содержащих кристаллическую фазу. Различная форма и ориентация частиц в пространстве приводят к тому, что размеры и распределения частиц по размерам, измеренные с помощью ФЭС, как правило, имеют мало общего с истинными распределениями.

Понимая это и учитывая острую необходимость исследования процессов зарождения и эволюции кристаллических облачных образований, В.В. Смирнов инициировал разработку приборов, основанных на принципе формирования и анализа изображений микрообъектов, движущихся в пространстве произвольным образом [20]. Впоследствии такие приборы получили название «телевизионные анализаторы аэрозолей».

Существенное развитие такой рода техника получила после выхода работы Г.Ф. Яскевича «О структуре расфокусированных изображений при частично когерентном освещении» [23]. В статье намечены пути преодоления ограничений, присущих телевизионным анализаторам аэрозолей и связанным со сложностью анализа изображений микрообъектов, попадающих в процессе регистрации не точно в плоскость наводки оптической системы датчика прибора. Были запатентованы и разработаны около десяти различных моделей анализаторов [17], отличавшихся оптическими схемами формирования изображений частиц, движущихся в объеме, элементной базой, алгоритмами и программами обработки изображений, средствами и уровнем автоматизации процессов измерений.

В целом телевизионные анализаторы аэрозолей – и в особенности их последние модели – анализаторы «ПОТОК», созданы на стыке нескольких направлений науки и техники и, по сути, представляет собой уже новое поколение приборов для

«невозмущающего» контроля параметров частиц различных форм и фазового состава, движущихся в пространстве. Они реализуют «прямые методы» измерений и по принципу действия, функциональным возможностям и точностным характеристикам к настоящему времени не имеют аналогов в мире. Важнейшими преимуществами анализаторов являются простота и наглядность метрологического обеспечения, основанного на возможности введении в поле зрения прибора частиц известных (и даже неизвестных) размеров, визуальном контроле процесса измерения с последующей проверкой результатов под обычным оптическим микроскопом с большим увеличением.

Применение анализатора для исследования микроструктуры облачных сред, формируемых в модельных установках НПО «Тайфун», позволило получить ряд интересных результатов, открывающих в том числе новые возможности активных воздействий на облачные образования в атмосфере.

Так, при проведении активных воздействий на переохлажденные облака с целью предотвращения града либо вызывания дополнительного количества осадков в определенную зону облака вводится большое количество центров кристаллизации, которые приводят к образованию ледяных кристаллов [11]. Предполагалось, что после возникновения ледяные кристаллы распространяются внутри облака, взаимодействуя с переохлажденными каплями и водяным паром, и не взаимодействуют между собой.

В действительности же эксперименты, проведенные в термобарокамере Института экспериментальной метеорологии НПО «Тайфун», показали, что кристаллы в процессе роста могут коагулировать между собой и существенно уменьшать общее количество центров роста частиц в облаке, снижая эффективность активных воздействий.

Весьма интересные результаты получены в НПО «Тайфун» с применением модернизированных вариантов анализаторов [17] для исследований процессов формирования и эволюции туманов смешения в ТБК, а также образования стратосферного аэрозоля в целях стабилизации климата путем антропогенного воздействия на климатическую систему, инициирующего реакции конверсии «газ ($\text{SO}_2 + \text{NH}_3$) – аэрозоль». Впервые в мире зарегистрированы распределения по размерам и изображения образовавшихся при конверсии SO_2 и H_2S субмикронных частиц серной кислоты и кристаллических частиц сульфата аммония, образующихся при

реакции с сернокислотным аэрозолем в модельных условиях, характерных для стратосферы под воздействием солнечного излучения.

Следует заметить, что разработанные в объединении телевизионные методы и средства измерения параметров аэрозолей имеют достаточно широкие перспективы развития в плане создания стационарных и бортовых систем контроля аэродисперсных сред любого базирования и назначения:

- стационарные и мобильные автомобильные комплексы контроля аэрозольной обстановки в проблемных районах (в частности пылемеры, сочетающие в одном приборе возможности современных приборов контроля параметров пыли классов $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$, PM_{10} , PM_{25} , измерители туманов и осадков, дальности видимости в условиях облаков и туманов и др.);

- самолетные средства, включая беспилотные, технологии контроля различного рода аэрозольных образований с концентрацией частиц до 10^8 см^{-3} и даже выше;

- средства контроля микроструктуры аэрозолей ракетного базирования;

- автоматизированные системы контроля различного рода гидрозолей, включая средства контроля состояния и состава планктона (от пико- до микропланктона) морских шельфов, в том числе концентрации и состава сине-зеленых водорослей и др.

Тем не менее телевизионные методы, реализованные в анализаторах микрообъектов аэрозолей, подобно ФЭС, тоже относятся к «контактным» технологиям контроля микрофизических и оптических характеристик аэрозолей и представляют собой класс методов и приборов, предназначенных преимущественно для исследования физических механизмов формирования, эволюции и активных воздействий на процессы в атмосфере.

Для них характерно:

- ограниченная продолжительность непрерывной работы;
- необходимость присутствия оператора во время работы;
- как правило – конкретные условия эксплуатации и режимы работы.

Для решения задач мониторинга (в особенности непрерывного) параметров природной среды требуется применение иного класса приборов, кратко рассматриваемого в следующем разделе настоящего обзора.

Дистанционные методы и средства мониторинга параметров природной среды

Данные дистанционного мониторинга атмосферы необходимы как для своевременного обнаружения в тропосфере и верхней атмосфере возмущений газовых и аэрозольных компонент искусственного и естественного происхождения, так и для понимания процессов формирования и изменения климата на планете, определения диапазона его естественных вариаций. Весьма важны они и для оценки последствий влияния на климат антропогенных факторов.

Весьма перспективными инструментами для осуществления подобного мониторинга представляются приборы, реализующие дистанционные методы зондирования (например, лидары, анализаторы газового состава атмосферы, спектрофотометры, различного типа радиометры и др.).

Лидарные методы и средства контроля параметров аэродисперсных сред относятся к активным технологиям локации аэрозольной и газовой компонент атмосферы. Их физическая суть (подобно ФЭС) основана на регистрации результатов взаимодействия зондирующего лазерного излучения с корпускулярными и газовыми элементами атмосферы и последующем решении обратной задачи теории рассеяния излучения малыми частицами.

К настоящему времени в мире насчитывается более сотни различных моделей лидаров и их вариаций в зависимости от решаемой задачи, принципа действия, применяемой элементной базы, схемных решений и конструктивных особенностей. В НПО «Тайфун» (в те годы – ИЭМ) разработки подобных средств мониторинга атмосферы начались в середине семидесятых годов двадцатого века и были поручены Н.П. Романову и В.А. Коршунову. После образования в 1978 г. отдела физики климата работы возглавил С.С. Хмелевцов. Первоочередными задачами на этом этапе являлись: выбор схемы лидара, длин волн зондирующего излучения, разработка конструкции устройства, алгоритмов и программ обработки сигналов обратного рассеяния в целях определения микроструктуры облаков, дальности видимости и высоты нижней границы облачности. Ставилась также задача обнаружения присутствия подоблачной дымки, которая состоит из очень мелких капель размером 0,1 мкм и менее. Она является признаком начала образования водяного облака.

Первые сообщения о разработке и применении лидара в ИЭМ [13] (Репринт работы приведен на с. 417–423.) показали принципиальную возможность и перспективность метода для дистанционного зондирования характеристик тропосферных облаков. Однако при практическом использовании лидаров для решения этих задач возникают серьезные сложности с обработкой сигналов обратного рассеяния и экспериментальной проверкой конечных результатов измерений. Оказалось, например, что практически при любых условиях зондирования облаков для получения корректных результатов необходим учет влияния многократного рассеяния излучения на частицах контролируемой среды. Потребовались серьезные усилия по анализу и разработке процедур преодоления этих трудностей [14, 15]. В результате были созданы оптические схемы, а также конструкции лидаров с алгоритмами и программами обработки сигналов, использующими конкретную (в зависимости от решаемой задачи) априорную информацию для определения оптических и микрофизических параметров тропосферных облаков и подоблачной дымки [9, 15]. Были проведены многочисленные эксперименты в различных метеорологических условиях по калибровке и сопоставлению результатов измерений параметров естественных и искусственных облачных образований с помощью лидарных и различного рода контактных технологий. Уже к середине восьмидесятых годов двадцатого века в НПО «Тайфун» созданы несколько моделей лидаров, ориентированных на решение задач контроля различных параметров атмосферы. На их базе к 1985 году была разработана и запущена в эксплуатацию обнинская лидарная станция [22], в состав которой входили как стационарные лидары, так и мобильный лидарный комплекс «Макет-2». Последний, наряду с определением характеристик атмосферного аэрозоля, облачных образований и концентрации озона, позволял проводить поляризационные измерения. Одной из основных задач станции являлось обеспечение систематических исследований атмосферного аэрозоля при одновременных измерениях концентрации озона. Согласно [22], эта задача возникла в связи с появившейся в западной литературе информацией о возможной зависимости вариации концентрации озона от изменения концентрации стратосферного аэрозоля. Поэтому данные одновременных измерений озона и аэрозоля могли бы выявить механизмы такой связи и способствовать прогнозу возможных изменений озонового слоя.

К сожалению, из-за отсутствия финансирования в конце девяностых – начале двухтысячных годов систематические исследования на обнинской лидарной станции были фактически приостановлены.

Новым толчком к развитию в НПО «Тайфун» лидарных методов контроля параметров атмосферы послужила необходимость интенсификации геофизического мониторинга в связи с актуализацией климатических проблем, повышением загрязненности атмосферы, обусловленным в целом эндогенными и антропогенными факторами. Немаловажное значение имело и некоторое улучшение в конце двухтысячных годов финансовой ситуации в стране. В.А. Коршунов возглавил это направление работ на новом этапе. Основное внимание предстояло уделить развитию лидарных средств мониторинга аэрозолей, полей температуры и озона в стратосфере.

На основе собственного и мирового опыта создания подобного рода техники В.А. Коршуновым с сотрудниками были усовершенствованы оптические схемы, конструкция, алгоритмы и программы обработки сигналов обратного рассеяния от аэрозольной и газовой компонент атмосферы.

Достаточно подробно применение разработанных в НПО «Тайфун» лидаров и анализаторов газов атмосферы обсуждается в разделе «Физика климата и климатообразующие факторы» настоящего сборника. Здесь отметим лишь некоторые особенности лидаров, связанные с контролем параметров микроструктуры аэрозолей:

1. В целях упрощения конструкции и технического обслуживания изделий созданные в объединении модели лидаров способны работать только в ночное время суток.

2. Для получения сведений о микроструктурных характеристиках атмосферного аэрозоля применяемые алгоритмы и программы обработки принимаемых сигналов обратного рассеяния предполагают использование определенного набора априорных данных (либо предположений) как о контролируемом аэрозоле, так и свойствах столба атмосферы в зоне измерений.

3. Вследствие заложенного в приборах принципа действия определение концентрации и истинной функции распределения аэрозольных частиц связано с серьезными трудностями.

По этой причине В.Н. Иванов инициировал (в дополнение к лидарным методам) исследования и разработку в НПО «Тайфун»

технологий мониторинга аэрозольной и газовой компонент атмосферы, основанных на анализе изображений Солнца и его окрестности, включая ореолы и гало. Ставилась задача создания новых технических средств дистанционного зондирования аэрозольной и газовой компонент атмосферы (в том числе облаков верхнего яруса), способных обеспечить получение достоверных, метрологически обеспеченных данных об их микроструктуре, фазовом состоянии и концентрации облачных частиц, как в режиме целенаправленных исследований, так и в режиме непрерывного мониторинга. Работы были поручены сотрудникам сектора «Микрофизические и оптические исследования облачных сред» ИЭМ.

В результате проведенных исследований была разработана адаптированная к реальным условиям измерений математическая модель и создан новый метод дистанционного зондирования параметров атмосферы – комбинированный метод ореолов (КМО). Инструментально метод реализован в модернизированном под эти задачи приборе SAM [24], получившем название «Комплекс спектрофотометрический «АГАТ» [10].

В основе КМО, заложенного в приборе «АГАТ», лежит зависимость характеристик излучения, рассеянного коллективом аэрозольных частиц, от микроструктуры и фазового состояния частиц в облаке. При наблюдении с Земли рассеянное облаками излучение воспринимается наблюдателем в виде разнообразных оптических явлений, известных как «ореолы» («венцы»), «гало» и др. В геометрических, спектральных и денситометрических параметрах изображений Солнца, солнечных ореолов и гало, возникающих вследствие рассеяния излучения облачными частицами и зарегистрированных, например, фото- или телекамерами, содержится информация о микроструктуре и фазовом состоянии облаков – источников рассеянного излучения.

Измеряя геометрические и денситометрические характеристики изображений Солнца и его ближайшей окрестности, комплекс «АГАТ» позволяет рассчитать оптические и микрофизические характеристики столба атмосферы в зоне контроля.

В целом с помощью прибора возможно определение:

- общего количества распределения по размерам и фазового состава аэрозольных частиц в столбе атмосферы контролируемой зоны;

- коэффициента ослабления оптического излучения столбом атмосферы;

- прямой и диффузной составляющих оптической толщины атмосферы;
- соотношения одно- и многократного рассеяния излучения аэрозольной средой;
- содержания водяного и других МГС в столбе атмосферы и др.

Благодаря широкому спектру контролируемых параметров аэродисперсных сред с помощью спектрофотометра «АГАТ» был получен ряд интересных научных результатов по изучению характеристик тропосферного и стратосферного аэрозоля [10].

Так, выделение прямой t_b и диффузной t_d компонент оптической толщины атмосферы позволяет с применением спектрофотометра «АГАТ» выявлять динамику изменения во времени микроструктуры аэрозоля в атмосфере в диапазоне размеров от 10^{-3} до 10^3 мкм, существенно превышающем диапазон размеров частиц, доступный для контроля всеми известными средствами измерений. Следует заметить, что экспериментальное определение содержания в атмосфере мелкой фракции аэрозоля, а также учет многократного рассеяния позволит более корректно рассчитывать объемные коэффициенты поглощения и рассеяния не только капель, но и других компонентов облачного слоя, уточнять их вклад в формирование радиационного режима облачной атмосферы.

В этой связи представляется весьма перспективным создание на базе спектрофотометра «АГАТ» комбинированной технологии активно-пассивной локации для измерения широкого спектра микрофизических и оптических характеристик атмосферы в любое время суток.

Тем не менее, несмотря на порой уникальную информацию, получаемую с помощью представленных в настоящем разделе методов и средств контроля атмосферы, ее часто оказывается недостаточно для решения многих прикладных задач [2–6]. Так, до настоящего времени определение форм и балла облачности, определяющих количество приходящей коротковолновой радиации и противоизлучения, непосредственно влияющих на радиационный баланс планеты, осуществляется субъективно и только в дневное время суток.

С приходом в 1974 году в ИЭМ Михаила Ивановича Алленова было развернуто новое направление работ, связанных с исследованиями стохастических пространственно-временных и спектральных структур излучения облачной атмосферы применительно к задачам параметризации и классификации облаков

в целях разработки методов и средств их распознавания средствами автоматике. Для решения этих задач в ИЭМ создается новое направление по разработке интерференционных оптических систем и оптических элементов [4, 5]. (Репринт работы [4] приведен на с. 424–427.)

На основе последних отечественных и зарубежных достижений были разработаны технологии изготовления интерференционных систем от ультрафиолетового до инфракрасного диапазонов длин волн для широкого спектра оптико-электронных приборов. Многие из них, например клиновые циркулярные фильтры на диапазон 1,0–2,5 и 5,0–16,0 мкм и многозональные микрофильтры, были созданы впервые в мировой практике [5].

С использованием разработанных интерференционных фильтров М.И. Алленовым с сотрудниками Н.Д. Третьяковым, А.С. Васильевым, Р.А. Давлетшиной и другими создано целое поколение различного типа (в том числе многоканальных) радиометров, для решения разнообразных задач и применения как в лабораторных, так и полевых (вплоть до Антарктиды) условиях. Приборы, на большинство из которых получены авторские свидетельства на изобретения, отличаются друг от друга быстродействием, чувствительностью, размерами поля зрения, диапазоном рабочих длин волн и условиями эксплуатации [3, 5]. Особенно интересными для практических применений представляются циркулярные клиновые интерференционные фильтры. Конструктивно они выполнены в виде круглой подложки с нанесенным на ее поверхность интерференционным покрытием. Длина волны максимального пропускания плавно меняется по длине окружности подложки [5].

На базе фильтров такой конструкции разработаны несколько моделей спектрорадиометров на диапазоны длин волн 0,4–0,68, 0,68–1,1, а также 2,0–3,5 мкм. На базе последнего создан прибор для исследования оптических характеристик жидкокапельных, кристаллических и смешанных облачных сред. Функциональные возможности прибора отражены в его названии – спектрометр-поляриметр-индикатрисометр («СПИН») [7].

Целесообразность разработки такого прибора вызвана необходимостью улучшения характеристик средств наблюдения за метеорологическими явлениями и последствиями экологических катастроф с космических платформ. Для решения этой задачи крайне необходимы детальные сведения о рассеивающих и

поляризационных характеристиках облачных сред, присутствие которых существенным образом меняет условия прохождения излучений от контролируемого объекта к системе наблюдения, затрудняет анализ и интерпретацию получаемых данных.

Получение таких сведений в крупногабаритных модельных установках объединения решает прибор «СПИН». К настоящему времени с его помощью получены весьма интересные результаты [25], показывающие характер и степень искажения сигналов ближнего ИК-излучения при прохождении через облачные среды, содержащие кристаллическую фазу.

С использованием всего арсенала разработанных М.И. Алленовым с сотрудниками радиометров в ИЭМ и НПО «Тайфун» в течение более тридцати лет проводились исследования пространственно-временных структур собственного излучения различных форм облачности в широком диапазоне длин волн. Целью исследований было создание параметризованной радиационной метеорологической классификации форм облачности по структурам ее собственного излучения в диапазоне длин волн от 8,0 до 13 мкм. В ходе многолетних исследований были определены радиационные, пространственные и пространственно-временные характеристики всех основных видов облачности: кучевой (Cu) и слоисто-кучевой (Sc) облачности, слоистых (St), высокослоистых (As) и перисто-слоистых (Cs) и других облаков, разработаны радиационные модели различных форм облачности.



*М.И. Алленов (крайний справа) и В.Н. Иванов (второй справа)
с группой разработчиков интерференционных фильтров*

Финальным этапом исследований стало создание не имеющей аналогов в мировой практике автоматизированной системы параметризации и распознавания форм и балла облачности (АСПРФО). Она позволяет получать объективную информацию для распознавания форм и количества облачности, определения скорости и направления движения полей облачности, высоты нижней границы облаков и высотном распределении радиационной температуры облаков и их эволюции [6]. В настоящее время на базе АСПРФО создана усовершенствованная модель системы – инфракрасный измеритель параметров облачности (ИКСИО), основанная на формировании и многопараметрической компьютерной обработке изображений, полученных в ИК-диапазоне длин волн полей облачности. Система проходит сравнительные со штатными метеорологическими средствами определения параметров облаков испытания.

Общие вопросы развития автоматизации научного эксперимента в НПО «Тайфун»

Для решения задач автоматизации научного эксперимента с первых шагов организации ИЭМ в 1968 году была сформирована группа электронно-вычислительной машины «Минск-2» (ЭВМ), которая в связи с расширением направлений исследований, необходимостью математического моделирования геофизических процессов и обработки результатов экспериментальных исследований в 1971 году преобразована в отдел автоматизации и средств вычислительной техники (АСВТ). Отдел возглавил В.И. Смирнов. Под его руководством наряду с решением задач математического моделирования в подразделении начали интенсивно развиваться работы, связанные с автоматизацией экспериментальных исследований по всем закрепленным за ИЭМ направлениям. Этому способствовало регулярное введение новых вычислительных мощностей: «М-3000», «М-6000», ЭВМ серии ЕС... и др., а также преобразование в 1979 году отдела в вычислительный центр (ВЦ), который в 1982 году возглавил И.Н. Додонов.

В целом же автоматизация научного эксперимента в ИЭМ и НПО «Тайфун» развивалась по двум почти независимым (иногда пересекающимся) направлениям. Первое из них основано на применении больших и малых вычислительных машин и связано с АСВТ и ВЦ. Основными задачами этого направления являлись

проведение математического моделирования различного рода геофизических процессов с использованием теоретических моделей, разработанных сотрудниками ИЭМ, а также оптических эффектов, связанных с рассеянием и распространением излучений в дисперсных средах. Второе направление развивалось, практически, в каждом научном отделе и было ориентировано на разработку специализированных автоматических систем приема и обработки экспериментальных данных (см., например [1, 13, 17, 19, 20 и др.]) с датчиков измеряемых параметров (тоже преимущественно собственной разработки). На первых порах устройства автоматики второго направления, реализованные, как правило, на дискретной элементной базе под строго определенный алгоритм обработки данных, обладали чрезвычайно высокими чувствительностью, быстродействием и мобильностью, были способны работать как в лабораторных, так и полевых условиях.

В то же время решение поставленных перед ИЭМ научных и практических задач, расширение масштабов и усложнение экспериментальных исследований, непрерывный рост объемов получаемой информации требовали все более широкого применения ЭВМ в целях автоматизации эксперимента. Достаточно остро вставал вопрос о создании автоматизированных систем для обеспечения научных исследований [16].

Одним из весьма удачных «пересечений» (комбинаций) этих двух направлений была разработка одной из моделей анализатора микроструктуры аэрозолей телевизионного «Аспект-10» [17], участие в разработке которого наряду с сотрудниками отдела № 4 ИЭМ принимали сотрудники ВЦ В.М. Шершаков, В.С. Косых и др. Эта разработка положила начало созданию нового поколения такого рода приборов, основанных на применении ПЭВМ для многопараметрического компьютерного анализа изображений микрообъектов, движущихся в пространстве произвольным образом.

Применение ЭВМ с большими и средними вычислительными мощностями приносило ощутимый результат при решении задач, связанных со сбором и обработкой больших потоков информации от нескольких (в том числе разнородных) датчиков. Так для исследований роста облачных капель под влиянием турбулентности атмосферы, проводимых с борта самолета-лаборатории [21], требовалось выполнять синхронные измерения таких параметров среды, как температура, водность,

видимость, аэрозольное рассеяние, концентрация и размеры облачных частиц. Необходимо было оценивать изменчивость всей совокупности параметров на границах и внутри облака. При существовавшем в то время уровне средств автоматизации решение этих задач было найдено на основе оптимального сочетания аппаратных средств регистрации первичных сигналов датчиков с записью на магнитную ленту и последующим введением информации с магнитного носителя в ЭВМ М-3000, где осуществлялась многопараметрическая обработка информации в пакетном режиме. Получаемые результаты использовались для решения ряда практических и теоретических задач физики атмосферы.

Интересен опыт создания макета передвижной станции для сбора и предварительной обработки данных на базе ЭВМ М-6000 [12]. Первой задачей для этой станции стала задача сбора данных в натуральных условиях от многих датчиков. Так, в диффузионном эксперименте с применением 30-метровой градиентной мачты измерялось около тридцати метеорологических параметров в приземном слое атмосферы. Как и в предыдущей работе, при разработке станции решались многочисленные вопросы ввода и формирования массивов данных, вопросы контроля и обработки введенного массива. Станция размещалась в прицепном автофургоне, прошла достаточно длительный цикл испытаний в натуральных условиях и показала надежную работоспособность.

Почти революционный характер развитие средств автоматизации научного эксперимента приобрело после появления на рынке персональных компьютеров, быстродействие и вычислительная мощность которых существенно превосходили аналогичные характеристики использовавшихся в ИЭМ вычислительных машин. Появилась возможность в реальном времени напрямую с датчиков контролируемых параметров вводить и обрабатывать объемы информации, значительно превосходящие объемы, доступные системам автоматизации, основанным на дискретной элементной базе. В подтверждение сказанному достаточно сравнить, например, характеристики первых и последних моделей анализаторов аэрозолей телевизионных «Аспект-10» [17] и «ПОТОК». Если первый способен измерять только размеры и концентрацию аэрозолей, применение быстродействующих ПЭВМ во втором дает возможность получать информацию о сорока и более микрофизических и оптических характеристиках контролируемых дисперсных сред. Аналогичная ситуация имеет место и с другими

средствами контроля окружающей среды (например, созданный в лаборатории А.В. Савченко автоматизированный стенд на базе горизонтальной аэродинамической трубы НПО «Тайфун» для проведения работ по сравнению эффективности генераторов льдообразующих аэрозолей различного типа).

Появление мощных высокопроизводительных ПЭВМ сделало экономически нецелесообразным дальнейшее развитие средств автоматизации научного эксперимента на базе больших вычислительных машин объединения. По этой причине, а также в связи с необходимостью контроля радиоактивного загрязнения окружающей среды в результате аварии на Чернобыльской АЭС на базе ВЦ НПО «Тайфун» посредством нескольких этапов был создан Федеральный информационно-аналитический центр (ФИАЦ) Росгидромета. В задачи центра входило обеспечение органов исполнительной власти оперативной информацией в чрезвычайных ситуациях, вызванных загрязнением окружающей среды. А это уже иные направления работ и уровень задач.

Важным этапом развития средств автоматизации, как, впрочем, и в целом технических средств мониторинга природной среды, явился выход в 2008 году закона «Об обеспечении единства средств измерений» с последующей редакцией от 13.07.2015 г. В законе сформулированы основные требования к разработке, конструкции, информационным, аналитическим и точностным



Автоматизированный стенд на базе горизонтальной аэродинамической трубы НПО «Тайфун» для оценки эффективности генераторов льдообразующих аэрозолей

характеристикам средств измерений, подлежащих в том числе государственному регулированию и применяемых в различных отраслях народного хозяйства. Для большинства приборов, разрабатываемых в НПО «Тайфун», это означало необходимость проведения испытаний на утверждение типа средств измерений. Подчиняясь этому закону, вновь разработанные в объединении модели приборов, например анализатор аэрозолей телевизионный «ПОТОК» и многие другие, были утверждены Госстандартом РФ в качестве типа средств измерений и занесены в Госреестр средств измерений. Однако еще задолго до этого для решения аналогичных задач в ИЭМ был создан отдел метрологии под руководством А.Ф. Ковалева, в составе которого сформирована под руководством А.Г. Сташкова группа аттестации и экспертизы используемых в объединении средств измерений. Проводились работы по созданию АСУ [8] с целью формирования информационно-справочных систем метрологической службы института. Создан макет информационно-справочной системы, объединяющий 25×10^4 единиц информации для 7000 средств измерений, позволяющий контролировать состояние конкретного средства измерения, периодичность поверки, предел измерений, стоимость поверки или ремонта, дату последней поверки или ремонта, местоположение средства измерений и т.д.

Заключение

Таким образом, как в ИЭМ, так в дальнейшем и в НПО «Тайфун» развитие и совершенствование методов и средств контроля и мониторинга природной среды, а также автоматизации научного эксперимента определялось совокупностью стоящих на каждом этапе перед объединением научно-практических задач, появлением новых знаний и технических возможностей имеющейся в мире элементной базы приборостроения. В целом же методы и приборы, разрабатываемые в ИЭМ и НПО «Тайфун», всегда находились на уровне, а нередко и превышали мировой уровень развития аналогичной техники.

Список литературы

1. Александров Э.Л., Лачихин А.В., Посадский В.И., Юдин К.Б. Самолетный фотоэлектрический измеритель облачных капель // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 19(72). С. 71–82.
2. Алленов М.И., Булгаков В.Г. Спектрорадиометрическая аппаратура для зондирования атмосферы и других природных образований // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 4(83). С. 3–22.
3. Алленов М.И., Мамонов В.К., Матвеев О.М., Печорин В.Т., Третьяков Н.Д. Многоканальный радиометр для исследования радиационной структуры полей природных образований // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 4(83). С. 3–22.
4. Алленов М.И., Васильев А.С., Давлетшина Р.А. Диэлектрические клиновые фильтры для области спектра 1,1–1,2 мкм // Труды ИЭМ. 1985. Вып. 9(124). С. 68–71. (Репринт статьи приведен на с. 424–427.)
5. Алленов М.И., Артюхов А.В., Васильев А.С., Давлетшина Р.А., Иванов В.Н., Третьяков Д.Н., Третьяков Н.Д. Нанотехнологии интерференционных систем НПО «Тайфун» для спектрометрии природных сред // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сб. статей под ред. А.Ф. Нерушева. 2010. Т. 1. С. 269–287.
6. Алленов М.И., Иванов В.Н., Третьяков Н.Д. Параметризация структур излучения и эволюции облачности. Под ред. проф. М.И. Алленова. Обнинск, 2013. 168 с.
7. Алленов М.И., Андреев Ю.В., Бородин С.А., Иванов В.Н., Мамонов В.К., Сташков А.Г., Третьяков Н.Д., Яскевич Г.Ф. Комплекс аппаратуры для исследования микроструктурных и оптических характеристик жидкокапельных и кристаллических облачных сред // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сб. статей под ред. А.Ф. Нерушева. 2010. Т. 1. С. 288–303.
8. Брызгин А.С., Ковалев А.Ф., Орлянский А.Д., Тесленко В.П., Шершаков В.М. К вопросу о построении АСУ метрологической службы института // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 6(107). С. 112–118.
9. Дрофа А.С., Коршунов В.А., Романов Н.П. Некоторые результаты исследования характеристик нижней границы слоистой облачности с использованием лидарного и других методов // Труды ИЭМ. 1991. Вып. 52(147). С. 124–143.
10. Иванов В.Н., Дрофа А.С., Яскевич Г.Ф., Бородин С.А. Некоторые вопросы дистанционного исследования облаков методом морфоденситометрического анализа изображений Солнца и солнечных ореолов // Тезисы докладов XVII рабочей группы «Аэрозоли Сибири». Томск, 2010. 80 с.
11. Ким Н.С., Яскевич Г.Ф. Применение телевизионной техники для изучения коагуляции ледяных кристаллов // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 7(112). С. 96–101.

12. Колосов Л.И., Попов М.И., Самарская Н.А., Шмаков В.Н. Макет передвижной станции для сбора и предварительной обработки данных на базе ЭВМ М-6000 // Труды ИЭМ. 1980. Вып. 5(94). С. 36–44.

13. Коршунов В.А., Романов Н.П. Некоторые результаты двухволнового лазерного зондирования нижней кромки облаков // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 19(72). С. 107–113. (Репринт статьи приведен на с. 417–423.)

14. Коршунов В.А. Зависимость вклада многократного рассеяния от угловой приемной апертуры в оптических сигналах обратного рассеяния // Труды ИЭМ. 1988. Вып. 45(135). С. 73–87.

15. Коршунов В.А., Романов Н.П., Гаргер Е.К., Жуков Г.П., Лукоянов Н.Ф. Определение параметров микроструктуры масляного тумана по данным четырехволнового лазерного зондирования и сопоставление с данными независимых контактных измерений // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 7(112). С. 112–124.

16. Новикова В.В., Соснова А.К. Обзор пакетов прикладных программ статистического анализа данных // Труды ИЭМ. 1980. Вып. 5(94). С. 3–12.

17. Панов В.Н., Яскевич Г.Ф. Телевизионный спектрометр аэрозолей «Аспект-10» // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 7(112). С. 34–48.

18. Романов Н.П. Учет геометрии фотоэлектрических счетчиков при расчете их рабочих характеристик // Труды ИЭМ. 1991. Вып. 52(147). С. 82–92.

19. Смирнов В.В. Основные характеристики спектрометров аэрозолей // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 7(112). С. 3–17. (Репринт работы приведен на с. 402–416.)

20. Смирнов В.В., Малахов В.А. Телевизионный счетчик облачных частиц // Труды ИЭМ. 1973. Вып. 4(38). С. 88–100.

21. Смирнов В.И., Юдин К.В. Регистрация и обработка данных при микрофизических исследованиях облачности // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 4(83). С. 40–49.

22. Хмелевцов С.С., Кауфман Ю.Г., Коршунов В.А., Светогоров Е.Д., Хмелевцов А.С. Лазерное зондирование атмосферных параметров на Обнинской лидарной станции НПО «Тайфун»: сб. статей «Вопросы физики атмосферы». СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 358–392.

23. Яскевич Г.Ф. О структуре расфокусированных изображений при частично когерентном освещении // Труды ИЭМ. 1976. Вып. 14(59). С. 94–103.

24. Статья [Электронный ресурс]. LePage, A. Description of SAM (Sun and Aureole Measurement) Sensor Data Collected in Support of CLASIC and CHAPS / A. LePage, S. Kras, J. DeVore. 2008. Режим доступа: [http://www.visidyne.com/SAM/VI-5311\(SamClasic+ChapsData\).j-2.pdf](http://www.visidyne.com/SAM/VI-5311(SamClasic+ChapsData).j-2.pdf), свободный

25. Anatoliy Anufriev, Vladimir Ivanov, Vladimir Yatzky, Gennady Yskevich. Mathematical modeling of atmospheric processes and observations of the Earth`s surface from space. SPIE`s Third International Asia-Pacific Remote Sensing Symposium 2002. Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment, and Space, Hangzhou, China 23–27 October 2002.



АВТОМАТИЗАЦИЯ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА СОСТОЯНИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В.А. Малышев, С.А. Сарычев

Автоматизация наблюдений – одно из важнейших направлений развития современной метеорологии. Именно эти задачи являются приоритетными в работе НПО «Тайфун» в области метеонаблюдений. И сейчас специалисты объединения (а ранее ИЭМ и ЦКБ ГМП) являются основными разработчиками в этой области.

Необходимо отметить, что СССР был пионером в области создания автоматических метеорологических станций. Еще в 1933 году была создана первая в мире автоматическая метеостанция П.А. Молчанова. В

1943–1947 гг. выпускались небольшими партиями станции типа АРМС для обеспечения наблюдений в Арктике и на Дальнем Востоке.

История создания и начало работы ИЭМ и ЦКБ ГМП началась с конца 50-х – начала 60-х гг. прошлого столетия. Все началось в 1956 году, когда был образован Институт прикладной геофизики (ИПГ) под руководством академика Е.К. Федорова. Именно в ИПГ в 1958 году были сформированы научные группы в области метеорологии, климата, а позже и по разработке метеорологических приборов. И в конце 1963 года научные коллективы с метеорологической тематикой были объединены и переданы в ведение Главного управления Гидрометеорологической службы (ГУГМС) СССР с образованием филиала ИПГ. Впоследствии из филиала ИПГ и были образованы как самостоятельные организации ИЭМ (1968 г.) и ЦКБ ГМП (1967 г.).

Именно с конца 50-х – начала 60-х гг., с момента образования ИЭМ и ЦКБ ГМП, работы «по внедрению средств автоматизации и механизации в основные виды гидрометеорологической службы» вышли на новый, более качественный уровень.

Уже в марте 1965 года специалистами тогда еще филиала ИПГ была начата большая работа по созданию автоматического телеметрического измерительного комплекса для Останкинской телевизионной башни в Москве, которая в то время еще строилась. Наряду с подготовкой к работам непосредственно на башне велись работы, связанные с модернизацией и реконструкцией существующих приборов, таких как датчики гололедно-изморозевых отложений, датчики для измерения скорости и направления ветра, приборы по актинометрическим измерениям [4].

Следующая крупная работа – разработка унифицированной автоматической телеметрической гидрометеорологической станции УАТГМС-4. Главным управлением Гидрометслужбы разработка станции была поручена ЦКБ ГМП с целью ее использования в качестве основного звена комплексной автоматизации гидрометеорологической сети. И первая экспериментальная очередь сети создавалась на территории Белорусской ССР. Станции УАТГМС-4 должны были обеспечивать автоматизацию большого комплекса наблюдений на метеостанциях и обсерваториях.

В 1969 году задание по созданию 50 УАТГМС-4 типа М-106 (гл. конструктор – И.П. Кузьминых) было выполнено. И в 1970 году экспериментальная система в Белоруссии

была полностью построена. Всего же было произведено около 200 станций типа М-106 и модернизированных станций М-106М (гл. конструктор – А.Г. Рошин) [4].

Станции успешно работали в Антарктиде на станции «Мирный» в периоды зимовок 1968/1969 и 1972/1973 гг.

Интересным направлением стали работы по автоматизации гидрологических и океанологических наблюдений, сформировавшееся в конце шестидесятых годов. Одной из ярких разработок стало создание океанологического зондирующего комплекса зонда-батометра (А.Д. Богачев, Н.М. Скурихин). Комплекс стал первым созданным в СССР прибором, включенным в Госреестр средств измерения для проведения стандартных океанологических работ. Комплекс предназначался для получения профилей температуры и электропроводности (солености) и отбора проб на стандартных глубинах с борта научно-исследовательских судов. Внедрение комплекса зонд-батометра в практику океанологических исследований принципиально изменило технологию получения информации о процессах, происходящих в поверхностном слое воды океана. Зонд по техническим показателям не уступал в то время зарубежным аналогам, а наличие батометрической секции делало его использование более эффективным.



Рис. 1. Станция М-106М

Всего было изготовлено и поставлено на суда Росгидромета более 60 комплексов. Оснащение научных судов зондами-батометрами позволило поднять уровень технической оснащенности при выполнении гидрологических работ до мирового уровня.

В середине 80-х годов началась разработка уникального буксируемого комплекса «Компас». Комплекс разрабатывался в ЦКБ ГМП по заказу НПО «Тайфун» для изучения условий зарождения тайфунов в Тихом океане [3]. (Репринт статьи с описанием научной составляющей эксперимента приведен в данном сборнике на с. 434–444.) Предполагалось сделать многокилометровый разрез поверхностного слоя океана до наступления тайфуна и после его прохождения, после чего производились расчеты по переносу тепла через поверхностный слой океана прошедшим тайфуном. Комплекс «Компас» представлял собой буксируемую гидролинию с тридцатью двумя измерительными контейнерами, установленными на тросе. Прием информации осуществлялся на бортовую ЭВМ. Основные экспериментальные работы были проведены на НИС «Академик Шокальский» и НИСП «Прибой» в 1989 и 1990 годах.

Кроме этого были разработаны и производились автоматические дистанционные гидропосты, обеспечивающие получение оперативной информации в цифровом виде о гидрологической ситуации на водных объектах. Комплекс предназначен для измерения температуры и уровня воды. Всего было изготовлено более 50 гидропостов.

С 1971 года начались работы по разработке ракетно-космической аппаратуры и обеспечению эксплуатации комплексов для пуска метеорологических ракет типа МР-12 (руководитель – А.А. Шидловский, главные конструкторы – Р.С. Левин, А.Б. Степанов). Пуски ракет производились на Земле Франса-Иосифа, Волгоградском полигоне, кораблях «Профессор Визе», «Профессор Зубов».

Также в начале 70-х годов начались работы в области создания автоматизированных систем наблюдения и контроля загрязнения окружающей среды АНКос (Ю.Ф. Ланин, В.Г. Авдеев, З.В. Ковнацкая). Были разработаны и изготовлены автоматизированные системы наблюдения поверхностных вод АНКос-В и воздуха АНКос-А, оснащенные автоматическими станциями контроля воды АСКПВ и воздуха АСКЗА (всего около 50 станций) [4]. Работы в этом направлении продолжаются и в настоящее время.

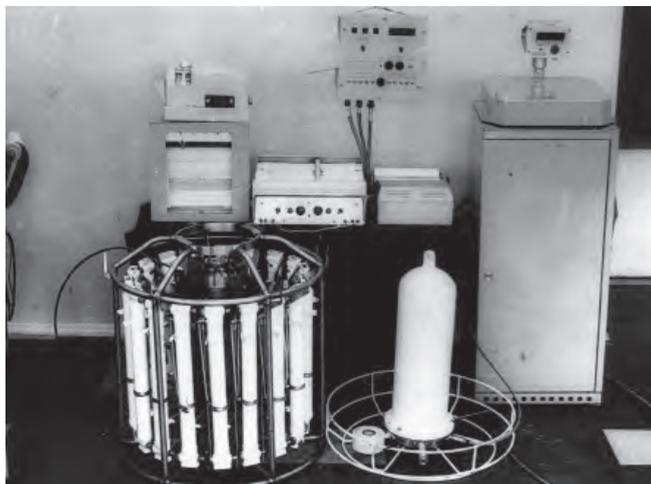


Рис. 2. Комплекс «Зонд-батометр»

Следует отметить очень интересную в середине 80-х годов работу по созданию автоматической магнитно-вариационной станции МВС АОД-80 для измерения магнитного поля Земли. (Л.Н. Краснобаев, В.В. Попов, С.А. Сарычев). Опытная эксплуатация станции проходила в суровых условиях Арктики (дрейфующая станция СП-28) и Антарктиды (станция «Восток»). В дальнейшем на геофизических станциях в Арктике было размещено двадцать станций МВС АОД-80.

В целом 60–80-е гг. прошлого столетия прошли под знаком активного внедрения автоматизации методов гидрометеорологических наблюдений.

В настоящее время работа в этом направлении ведется еще более целенаправленно. За последние годы был проведен ряд интересных и значимых работ, повышающих уровень автоматизации по всему спектру гидрометеонаблюдений и мониторингу окружающей среды.

Рассмотрим некоторые из них.

Одной из значимых работ была разработка системы комплексного экологического мониторинга загрязнения окружающей среды, которая базировалась на автоматических станциях контроля атмосферного воздуха АСК-А и автоматических станциях контроля поверхностных вод АСК-В.

Станции АСК-А как важные компоненты системы мониторинга загрязнения атмосферного воздуха предназначены для измерения в автоматическом режиме концентрации основных загрязняющих примесей, проведения отбора проб воздуха для определения концентрации специфических газовых примесей с целью дальнейшего анализа в химико-аналитической лаборатории, а также для измерения основных метеорологических величин. АСК-А созданы на базе разработанных в рамках научно-технической программы Росгидромета станций МР-28.

Станции АСК-А предназначены для измерения концентрации основных загрязняющих примесей (CO , SO_2 , H_2S , NO , NO_2 , NH_3 , $\Sigma\text{СН}$, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ и др.).

Непрерывный режим измерения на АСК-В и периодический отбор проб позволяет проводить анализ более чем по 40 показателям, характеризующим качество поверхностных вод.

Как итог, данная система была построена для экологического мониторинга загрязнения окружающей среды (СКЭМ) в период подготовки и проведения XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр-2014 г. в г. Сочи [7].



Рис. 3. Мобильная экологическая лаборатория во время работы на Олимпиаде-2014 в г. Сочи

В аппаратную часть СКЭМ вошло:

- шесть автоматических станций контроля атмосферы (АСК-А) в зонах проведения Олимпийских игр и в жилой зоне (непрерывный контроль в автоматическом режиме 11 загрязняющих веществ, три раза в сутки на двух станциях отбор проб в ручном режиме на 19 загрязняющих веществ);

- автоматический пункт контроля атмосферы (АПК-А) в зоне строительства олимпийских объектов (непрерывный контроль в автоматическом режиме четырех загрязняющих вещества);

– две мобильные экологические лаборатории контроля атмосферы (МЭЛ-А) в базовой и расширенной комплектации (контроль в автоматическом режиме содержания загрязняющих веществ, регулярный отбор проб воздуха в труднодоступных районах и по специальным маршрутам);

– мобильная гидрохимическая лаборатория – МЭЛ-В (контроль в автоматическом режиме содержания загрязняющих веществ, регулярный отбор проб воды в труднодоступных районах и по специальным маршрутам);

– две автоматические станции контроля воды – АСК-В (непрерывный контроль в автоматическом режиме по 9 показателям);

– шесть пунктов контроля воды (ПКВ) с периодическим отбором проб (контроль в ручном режиме раз в две недели по 8 показателям, шесть раз в год по 30–39 загрязняющим веществам);

– шесть пунктов контроля почвы (ПКП) с периодическим отбором проб (два раза в год контролируется концентрация 20 загрязняющих веществ).

Применение данной системы позволило полностью автоматизировать процессы наблюдений за уровнем загрязнения атмосферного воздуха и поверхностных вод основными группами загрязняющих веществ.

Данные о состоянии окружающей среды, поступающие от действующих в районе проведения Олимпийских игр компонентов системы комплексного экологического мониторинга, передавались в центр сбора, обработки и представления информации (ЦСОИ) в непрерывном режиме. Расчеты по данным оперативного прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха в период проведения Олимпийских игр проводились ежедневно в автоматическом режиме.

Созданная Система комплексного экологического мониторинга позволила обеспечить комплексный мониторинг состояния окружающей среды в зоне строительства и проведения игр 2014 года в Сочи. Был получен огромный практический опыт по созданию автоматизированных региональных СКЭМ. Данный опыт, безусловно, может быть востребован в рамках модернизации государственной системы мониторинга окружающей среды в разных регионах Российской Федерации.

Еще одной, заслуживающей внимания работой в этом направлении была реализация Системы экологического

мониторинга озера Байкал и Байкальской природной территории в 2015 году.

В рамках реализации программы в 2013–2015 гг. установлены и введены в эксплуатацию 21 автоматическая станция контроля загрязнения атмосферного воздуха (АСК-А), в том числе в Иркутском УГМС – 12 станций, в Забайкальском УГМС – 9 станций.

Перечень контролируемых в атмосферном воздухе в автоматическом режиме примесей на разных станциях составляет от 7 до 26, кроме этого, на месте отбора проб регистрируются основные метеорологические характеристики (скорость, направление ветра, температура, влажность). Станции также укомплектованы автоматизированными средствами отбора газообразных и аэрозольных примесей.

К началу нулевых годов актинометрические наблюдения, пожалуй, были одними из самых проблемных направлений метеорологии в нашей стране. Сложность и своеобразие работ в этом направлении заключается в том, что с распадом СССР актинометрия оказалась, пожалуй, в наиболее тяжелом состоянии по сравнению с другими метеонаблюдениями [6].



Рис. 4. Станция контроля загрязнения атмосферного воздуха АСК-А. Байкальская природная территория

В настоящее время ситуация изменилась в лучшую сторону. НПО «Тайфун» совместно с ГГО и ОАО «Пеленг» (Беларусь) проводят большую работу по модернизации сети Росгидромета в области автоматизации актинометрических наблюдений. Эти работы стали ярким примером успешного сотрудничества различных организаций России и Беларуси.

Автоматизацию измерений обеспечивают разработанные НПО «Тайфун» актинометрические комплексы МФ-19.

ОАО «Пеленг» (Беларусь) совместно с ГГО им. Воейкова были разработаны новые модификации актинометрических датчиков взамен и в дополнение к имеющимся на сети Росгидромета (пиранометр «Пеленг СФ-06» – аналог табельного пиранометра М-80, актинометр «Пеленг СФ-12» – аналог табельного М-3, всепогодный балансомер «Пеленг СФ-08», обладающий более лучшими характеристиками, чем табельный М-10).

НПО «Тайфун» был разработан блок центральный измерительный (БЦИ) специально для регистрации сигналов с актинометрических датчиков. Блок предназначен для периодического измерения уровней входных сигналов, хранения измеренных значений, передачи измеренных значений на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Модульное построение блока конструктивно может содержать от 4 до 28 каналов, по которым идет измерение, и позволяет обеспечивать передачу данных по интерфейсу обмена данными – RS485 или RS232, или USB.

Конструкция блока позволяет использовать его в качестве автоматического регистратора уровней сигналов, поступающих от датчиков, а также для работы в составе метеорологических станций на сети Росгидромета, в том числе автоматических метеорологических комплексов.

Данные, получаемые с датчиков, можно отображать как в виде таблицы, так и в виде графиков.

Вслед за разработкой БЦИ на его базе был разработан актинометрический комплекс МФ-19, состоящий из непосредственно БЦИ, набора датчиков и программного обеспечения, и работающий со всеми известными типами актинометрических датчиков, как отечественными, так и зарубежными [5, 6].

МФ-19 или БЦИ как самостоятельная единица предназначена для замены традиционных средств измерения уровней сигналов, поступающих от датчиков, и повышения качества и количества измеряемой информации.



Рис. 5. Комплекс МФ-19 в Антарктиде на станции «Прогресс»

Актинометрический комплекс МФ-19 успешно работает за Северным полярным кругом, в частности на Шпицбергене и на метеостанции «Тикси». Было принято решение также проверить работу комплекса на судне и в условиях антарктических широт в рамках 55 РАЭ [1].

Более того, это помогло устранить дефицит стандартных и специальных актинометрических измерений в прибрежных антарктических водах, теплосбалансовых и теплофизических измерений характеристик различных участков подстилающей поверхности.

В 2008–2011 гг. на станции «Якутск» была проведена опытная эксплуатация комплекса. Использовался полный комплект табельных актинометрических датчиков, установленных на табельном вспомогательном оборудовании, имеющемся на станции. Данные измерений поступали в ПК. Существенным облегчением в работе наблюдателя явились автоматизированные измерения часовых сумм радиации.

Важно отметить, что в Якутске БЦИ работал без сбоев в различных условиях, в том числе при температуре воздуха $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В настоящее время автоматический актинометрический комплекс успешно работает на сети Росгидромета.

В области агрометеорологии были разработаны автоматические измерители температуры поверхности почвы (грунта) АМТ-11 и влажности почвы (грунта) АМГ-10 [8].

Следует отметить и почвенный термометр АМТ-5 для измерения температуры почвы на глубинах от 20 до 240 см, который имеет возможность подключения до 12 датчиков (диапазон измерений – от минус 60 до 70 °С).

Термометры внедрены на агрометеорологическую сеть Росгидромета. Три комплекса установлены на международной гидрометеорологической обсерватории Тикси.

Важным результатом стала разработка агрометеорологического комплекса АМК-14. Это специализированный комплекс для стационарных измерений основных параметров водно-теплового режима сельскохозяйственных угодий, позволяющий производить измерения температуры и влажности почвы по четырем горизонтам в автоматическом режиме. Комплекс полностью автономен, питание осуществляется на базе солнечных батарей, передача информации – по сотовым или радиоканалам связи.

Применение измерителя почвы АМК-14 с единым центром сбора позволяет осуществлять территориальный мониторинг температуры и влажности почв на разных глубинах, что имеет большое значение для прогноза урожайности сельскохозяйственных культур [8].

Внедрение этих приборов на агрометеорологических постах позволяет значительно сократить ручной труд и повысить достоверность результатов.

В настоящее время огромное значение придается радиационному мониторингу. И можно с уверенностью отметить, что НПО «Тайфун» является одним из лидеров этого направления. Еще в 1970 году в ИЭМ начинались разработки в этом направлении [2]. (Репринт статьи о первых уникальных разработках фильтрующих установок приведен на с. 428–433.)

Были разработаны три типа фильтрующих установок:

– установки стационарного типа для отбора из воздуха больших



Рис. 6. Почвенный термометр АМТ-5

количеств аэрозолей, позволяющих проводить полный изотопный анализ;

- экспедиционный вариант, предназначенный для использования на морских судах;

- установки, позволяющие автоматически менять фильтры по заранее заданной программе.

В настоящее время работа в этом направлении продолжается и расширяется. Разработана и выпускается вся линейка воздухофильтрующих установок (УВФ) – от малогабаритных установок до современных постов контроля радиационной обстановки с системой жизнеобеспечения МР-40.

УВФ позволяет решить следующие задачи:

- определять момент появления аварийного радиоактивного загрязнения воздуха с выдачей на компьютер соответствующего тревожного сигнала;

- использоваться как алармовая система раннего предупреждения с выводом в региональный центр сбора информации данных со всех УВФ региона;

- изменить регламент работы УВФ на сети, например, существенно увеличить время экспозиции фильтра.



Рис. 7. Установка воздухофильтрующая малогабаритная

Производимые в НПО «Тайфун» УВФ и посты имеют ряд преимуществ перед аналогичным оборудованием других производителей, а именно:

- автоматическое изменение с малой погрешностью интегрального расхода воздуха за любое время экспозиции фильтра;

- возможность дистанционного контроля за работой установки, т.е. возможность получения информации о работе установки в процессе ее работы;

- возможность устанавливать любой сценарий работы УВФ в течение суток, т.е. работать в дискретные сроки;

- возможность мониторинга переноса, т.е. включение УВФ только при направлении ветра от источника;
- управление с компьютера сразу несколькими УВФ по со-товой связи;
- возможность использования УВФ сокращенной комплек-тации без датчиков измерения поверхностной бета-активности и мощности амбиентной дозы рентгеновского и гамма-излучения.

Показательным примером работы информационно-измерительной системы является тот факт, что в период аварии на японской АЭС «Фукусима-1» УВФ, установленная в г. Обнинске на территории НПО «Тайфун», зафиксировала момент поступления загрязненного радиоактивными продуктами аварии воздуха.

Установки производства НПО «Тайфун» работают практически на всех атомных станциях Российской Федерации, на предприятиях Росатома, на объектах, где контролю радиационной обстановки придается повышенное внимание.

Конечно, в данной статье трудно охватить все разработки НПО «Тайфун», направленные на автоматизацию метеонаблюдений, а это и метеокомплексы МК-14, МК-15, МК-18, современный автоматический бесконтактный осадкомер «Капля» для измерения жидких осадков и автоматический бесконтактный снегомер «НАСТ», предназначенный для автоматического измерения и регистрации высоты снежного покрова, цифровой кварцевый барометр МД-20, гидрометеорологический комплекс ГМУ-4 [8] и многое-многое другое.



Рис. 8. Пост МР-40

Список литературы

1. Волчков А.В., Малышев В.А. Актинометрические наблюдения на НЭС «Академик Федоров» // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сборник статей, посвященный 50-летию НПО «Тайфун». Т. 4. Обнинск, 2010. С. 101–108.

2. Давыдов Е.Н., Малахов С.Г., Махонько К.П., Машков С.Т. Фильтрующие установки для определения концентраций радиоактивной пыли в приземной атмосфере // Труды ИЭМ. Вып. 2. Приборы и методы загрязнения внешней среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. С. 98–103. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 428–433.)

3. Королев В.С., Петриченко С.А., Пудов В.Д., Чернецкий Ю.Н. Пространственно-временные неоднородности полей температуры и солености в северо-западной части Тихого океана // Труды ИЭМ. 1996. Вып. 27(162). С. 69–79. (Репринт статьи приведен в сборнике на с. 434–444.)

4. Кузьминых И.П. Центральное конструкторское бюро гидрометеорологического приборостроения. Научно-производственное объединение «Тайфун». Книга 1. Зарождение и становление. Обнинск, 2010. С. 271–278.

5. Малышев В.А., Луцько Л.В., Соколенко С.А., Бычкова А.П., Казев Ю.И., Шевченко А.И. О техническом переоснащении актинометрической сети Росгидромета // Метеоспектр № 1. М., 2013. С. 150–156.

6. Малышев В.А., Попов В.В., Луцько Л.В., Соколенко С.А., Миллер Е.А. Перспективы развития актинометрических наблюдений на сети Росгидромета // Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды: сборник статей, посвященный 50-летию НПО «Тайфун». Т. 4. Обнинск, 2010. С. 51–59.

7. Сарычев С.А., Дудина Л.И., Запевалов М.А., Косых В.С., Нечаев Д.Р., Полетаева Н.Н., Семенова И.В., Любимцев А.Л. Система комплексного экологического мониторинга Сочи-2014 // Метеорология и гидрология. 2015. № 8. С. 78–87.

8. Сарычев С.А., Мишина В.Ф. Практическое применение результатов, полученных в ходе реализации Программы Союзного государства 2007–2011 гг. по разделу «Развитие единых систем гидрометеорологических наблюдений, их технического, технологического и метрологического обеспечения» // Метеоспектр № 1. М., 2015. С. 35–42.



**РЕПРИНТЫ
ОСНОВОПОЛАГАЮЩИХ
СТАТЕЙ СОТРУДНИКОВ
НПО «ТАЙФУН»
ИЗ ТРУДОВ ИЭМ**

Ю. С. СЕДУНОВ

ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ НА КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛАЧНОГО СПЕКТРА ПУТЕМ ВВЕДЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЯДЕР КОНДЕНСАЦИИ

В последние годы широким фронтом развернулись исследования по поиску и разработке методов искусственного воздействия на облака. Определенный интерес может представлять идея о том, как путем изменения свойств ядер конденсации можно воздействовать на начальную стадию образования облака и соответственно на его дальнейшее развитие. Изменение свойств ядер конденсации может быть произведено различными способами. Однако, как можно представить себе мысленно, наиболее доступным является внесение дополнительного количества ядер конденсации в атмосферу. Дело в том, что очистить большие массы воздуха от ядер конденсации технически пока невозможно.

Идея обработки ядер конденсации поверхностно-активными веществами (ПАВ) пока еще недостаточно обоснована, поскольку неясно, можно ли ее реализовать в больших масштабах, неясно, как будут распределяться ПАВ по спектру ядер, что при этом в целом получится и как это повлияет на кинетику конденсации. Наиболее простым способом воздействия является введение дополнительных искусственно образованных ядер конденсации. Эти дополнительные ядра могут быть получены различными способами и, в принципе, производиться в больших количествах, заполнять большие объемы воздуха. Малая масса отдельных частиц позволяет в достатке доставлять их к месту воздействия. Иными словами, загрязнить атмосферу примесями значительно проще, чем очистить ее от них.

Исходя из этих соображений, попытаемся исследовать возможный эффект, который будет иметь место при наличии в атмосфере помимо обычных аэрозолей дополнительно введенной примеси. Пусть функция распределения естественного спектра ядер конденсации по пересыщениям в соответствии с разработанной в [1, 2] моделью ядер конденсации удовлетворяет степенному закону. Предположим, что дополнительно внесенные ядра имеют одинаковый размер и состав. В этом случае они будут активироваться при некотором значении пересыщения $\delta_{гр}$, а их распределение должно описываться дельта-функцией. Таким образом, в целом функция распределения ядер по пересыщениям может быть представлена в виде

$$n(\delta) = p\delta^l + l\delta_1(\delta - \delta_{гр}), \quad (1)$$

где δ_1 —дельта-функция,

p и l —параметры, характеризующие естественный спектр,

а λ и $\delta_{гр}$ (пересыщение)—концентрацию и активность или размер введенных ядер соответственно.

Цель нашего анализа заключается в следующем. Посмотрим, как будут влиять дополнительные ядра на начальную стадию конденсации, фактически на образование капель в облаке, если варьировать значения параметров λ и δ_{TP} , т. е. концентрацию и дисперсность искусственных ядер. Анализ проведен при помощи модели процесса начальной стадии конденсации на основе уравнения, использованного в [2]. Это уравнение имеет следующий вид:

$$y''(t) = k_1 - k_4 y'(t) \int_0^t [y(t) - y(t_0)]^{\frac{1}{2}} y'^t(t_0) y''(t_0) dt_0, \quad (2)$$

где

$$y(t) = \int_0^t \delta(\tau) d\tau,$$

$$t = \begin{cases} t & t \leq t_{max} \\ t_{max} & t > t_{max} \end{cases}$$

$$k_1 = \left(\frac{LM}{RT} - \frac{c_p M_1}{R} \right) \frac{\gamma_a}{T} v_z,$$

$$k_4 = 4\pi D\rho \left(1 + \frac{LM}{RT} - \frac{L}{c_p T} - \frac{z_0}{r_1} \right) \left(2D \frac{\rho_a}{\rho_b} \right)^{\frac{1}{2}},$$

где L — теплота конденсации,
 M, M_1 — молекулярный вес воды и воздуха соответственно,
 R — универсальная газовая постоянная,
 c_p — удельная теплоемкость воздуха,
 T — температура,
 γ_a — адиабатический градиент,
 v_z — вертикальная скорость воздуха,
 \bar{D} — коэффициент диффузии пара,
 ρ_a, ρ_1, ρ_b — плотность насыщенного пара, воздуха и воды соответственно,
 t_{max} — время достижения максимума пересыщения.

Запишем уравнение, характеризующее изменение пересыщения во времени, с учетом того, что наличие дополнительных ядер приводит к функции распределения, не являющейся степенной, а удовлетворяющей соотношению (1). Это уравнение будет иметь следующий вид:

$$y''(t) = k_1 - k_4 y'(t) \int_0^t [y(t) - y(t_0)]^{\frac{1}{2}} y'^t(t_0) y''(t_0) dt_0 - k_6 y'(t) [y(t) - y(t_1)]^{\frac{1}{2}} \Theta [y'(t) - y'(t_1)], \quad (3)$$

где

$$k_6 = \frac{ik_4}{\rho},$$

$$y'(t_1) = \delta_{TP}, \quad \Theta — \text{гэта-функция.}$$

Уравнение (3) допускает понижение порядка. После интегрирования получим

$$y'(t) = k_1 t - \frac{2}{3} k_4 \int_0^t [y(t) - y(t_0)]^{\frac{1}{2}} [y'(t_0)]^{\frac{1}{2}} y''(t_0) dt_0 - \\ - \frac{2}{3} k_4 [y(t) - y(t_1)]^{\frac{3}{2}} \leftrightarrow [y'(t) - y'(t_1)]. \quad (4)$$

Замена переменных

$$y = k_1 \left(\frac{1}{k_1^{\frac{3}{2} + t} k_4} \right)^{\frac{2}{1+3}} z; \quad t = \left(k_4 k_1^{\frac{3}{2} + t} \right)^{-\frac{1}{\tau}} \quad (5)$$

приводит (4) к следующему виду:

$$z'(\tau) = \tau - \frac{2}{3} \int_0^{\tau} [z(\tau) - z(\tau_0)]^{\frac{3}{2}} [z'(\tau_0)]^{\frac{1}{2}} z''(\tau_0) d\tau_0 - \\ - \frac{2}{3} \alpha [z(\tau) - z(\tau_1)]^{\frac{3}{2}} \leftrightarrow [z'(\tau) - z'(\tau_1)], \quad (6)$$

где

$$\alpha = k_1^{-\frac{3(l+1)}{2(l+3)}} k_4^{-\frac{2}{l+3}} k_5, \quad (7.1)$$

$$\tau_1 = \left(k_1^{\frac{3}{2} + l} k_4 \right)^{-\frac{1}{2+l}} t_1, \quad (7.2)$$

$$z'(\tau_1) = k_4^{\frac{1}{3+l}} k_1^{-\frac{3}{2(l+3)}} \delta_{rp}. \quad (7.3)$$

Уравнение (6) и будет в дальнейшем служить нам основой для проведения численного эксперимента по воздействию ядрами конденсации. Решая это уравнение, мы определим максимальное пересыщение, которое может быть достигнуто в процессе охлаждения воздуха, а зная величину δ_{\max} , легко найдем количество капель, которое образовалось в итоге. Варьируя концентрацию λ , мы определим влияние количества примеси на кинетику процесса, а меняя δ_{rp} — влияние дисперсности. По некоторым соображениям, удобнее варьировать не саму величину δ_{rp} , а величину t_1 — время вступления в действие ядер конденсации. Между t_1 и δ_{rp} можно установить однозначную связь, если иметь в виду, что изменение $y'(t) = \delta(t)$ нам известно до момента, пока не вступила в действие добавка ядер. Закон изменения $y'(t)$ можно получить, если решать уравнение (2) или уравнение (6) при $\alpha = 0$. В силу монотонности $y'(\tau)$ на начальном участке ($t < t_{\max}$), чем больше δ_{rp} , тем в более поздний момент оно достигается в ходе естественного процесса. Поэтому задание t_1 , по существу эквивалентно заданию δ_{rp} .

Прежде чем перейти к обсуждению результатов расчетов уравнения (6), выясним физический смысл параметра α . Если предположить, что идет процесс без наличия дополнительных ядер конденсации, то со-

гласно [2], число образовавшихся капель N_0 может быть представлено следующей формулой:

$$N_0 = \frac{\rho}{l+1} \left(\frac{k_1}{k_4} \frac{z}{2} \right)^{l+1} [z'_0(\tau_{\max})]^{l+1}, \quad (8)$$

где $z'_0(\tau_{\max})$ — значение z' в максимуме при $\alpha = 0$.

С учетом (8) выражение (7.1) принимает вид

$$\alpha = \frac{\rho}{(l+1)N_0} \frac{k_5}{k_4} [z'_0(\tau_{\max})]^{l+1}. \quad (9)$$

Учитывая, что $k_5 = \frac{\lambda k_4}{\rho}$, получим

$$\alpha = \frac{[z'_0(\tau_{\max})]^{l+1}}{l+1} \frac{\lambda}{N_0}. \quad (10)$$

Из (10) видно, что величина α по существу характеризует долю добавленных ядер по отношению к числу ядер, переходящих в капли при не возмущенных условиях. Множитель $\frac{[z'_0(\tau_{\max})]^{l+1}}{l+1}$ близок к единице и является постоянной величиной для данного вида спектра ядер. Например, для $l=1$,

$$\frac{[z'_0(\tau_{\max})]^2}{2} \approx 0,81.$$

Общее число капель, образовавшихся в условиях, когда имеется добавка искусственных ядер, соответственно равно

$$N = N_1 + \lambda = N_0 \left(\frac{N_1}{N_0} + \frac{\lambda}{N_0} \right) = N_0 \left\{ \left[\frac{z'(\tau_0, \tau_1, \tau_2)}{z'_0(\tau_{\max})} \right]^{l+1} + \frac{(l+1)\alpha}{[z'_0(\tau_{\max})]^{l+1}} \right\}. \quad (11)$$

Первое слагаемое в фигурных скобках характеризует отношение капель, образовавшихся из естественных ядер при действии дополнительных ядер, к числу капель, образующихся без действия добавки. Это отношение, как правило, меньше единицы и характеризует как бы уменьшение эффективности действия естественных ядер.

Второе слагаемое характеризует относительную долю капель, образовавшихся из искусственных ядер. Эта величина положительна, она определяет дополнительный эффект влияния искусственных ядер. Оптимальное воздействие должно быть проведено таким образом, чтобы первое слагаемое не было малым и не отличалось особенно от единицы, а второе было бы максимальным. При этом следует иметь в виду, что чрезмерное увеличение второго слагаемого за счет роста концентрации λ и соответственно α , не представляет особого интереса, так как, во-первых, если $\lambda \gg N_0$, то речь может идти об образовании капель исключительно на искусственных ядрах, когда уже не надо ставить вопроса об эффективности, и, во-вторых, этот случай требует очень мощного загрязнения атмосферы (более тысячи частиц на 1 см^3).

Перейдем непосредственно к результатам расчета. Уравнение (6) решалось численно на ЭВМ «Минск-2». На рис. 1 а, б, в, приведены примеры изменения $z'(\tau)$ для различных значений α и τ_1 . Для сравнения на этих же рисунках нанесена кривая, характеризующая естественный ход процесса изменения τ . Ход полученных кривых соответствует качествен-

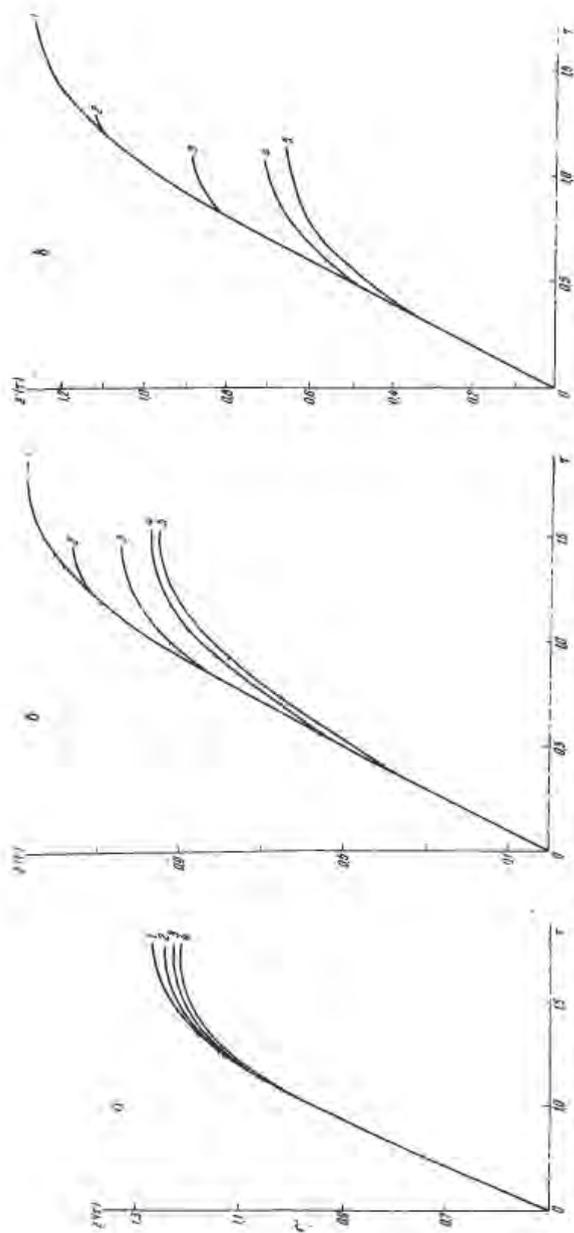


Рис. 1. График зависимости $z'(\tau)$ для случая, когда концентрация дополнительных ядер определяется значением α , и активность — временем вступления в действие, величиной τ . Везде кривая 1 — естественный ход процесса.
 При $\alpha=0.1$ (а): 2— $\tau=1.6$; 3— $\tau=0.8$; 4— $\tau=0.4$; 5— $\tau=0.1$. При $\alpha=0.7$ (б): 2— $\tau=1.2$; 3— $\tau=0.8$; 4— $\tau=0.4$; 5— $\tau=0.2$.
 При $\alpha=1.6$ (в): 2— $\tau=0.8$; 3— $\tau=0.4$; 4— $\tau=0.2$.

ным представлениям, развитым выше. До момента введения в действие искусственных ядер ход процесса совпадает с естественным ходом, однако после вступления в действие искусственных ядер рост пересыщения замедляется и максимум пересыщения, который достигается при этом, будет меньше, чем при естественном процессе.

Это уменьшение максимума $z'(\tau_{\max})$, ведущее к уменьшению числа капель, образовавшихся из естественных ядер тем больше, чем раньше проявится действие искусственных ядер. Более подробно результаты расчета $z'(\tau_{\max})$ для случая $l=1$ представлены в табл. 1. Анализ полученных результатов показывает, что введение дополнительных ядер (по крайней мере при тех спектрах, какие использованы в расчетах) всегда приводит к увеличению общего числа образовавшихся капель, т. е. $N > N_0$.

Результаты расчетов величины $\frac{N}{N_0}$

Таблица 1

lN_0	α	$\frac{N}{N_0}$									
		0,1	0,2	0,4	0,5	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5	1,8
0,123	0,1	1,038	1,039	1,042	1,048	1,055	1,066	1,081	1,098	1,115	1,123
0,247	0,2	1,085	1,086	1,092	1,103	1,118	1,141	1,17	1,203	1,233	1,247
0,616	0,5	1,267	1,27	1,285	1,31	1,347	1,402	1,471	1,542	1,597	1,616
0,863	0,7	1,419	1,424	1,443	1,476	1,527	1,6	1,69	1,779	1,843	1,863
1,10	0,9	1,591	1,597	1,619	1,66	1,723	1,812	1,919	1,983	2,088	2,109
1,480	1,2	1,876	1,883	1,91	1,96	2,038	2,147	2,272	2,385	2,457	2,479
1,85	1,5	2,185	2,192	2,222	2,28	2,37	2,494	2,632	2,752	2,822	2,849
2,464	2,0	2,73	2,739	2,774	2,841	2,947	3,08	3,239	3,366	3,432	3,464

Это показывает, что воздействие путем введения дополнительных ядер приводит к увеличению числа капель в облаке, что в свою очередь может привести к более высокодисперсному распределению и, следовательно, к большей коллоидальной устойчивости облака.

Второй вывод, который можно сделать на основе полученных результатов, заключается в следующем. Эффективность действия дополнительных ядер в существенной степени зависит от их активности. Воздействие будет иметь наибольший эффект, если ядра будут иметь минимальную активность (в пределах того диапазона размеров или активностей, из которого происходит образование капель) и переходят в капли в момент достижения максимума пересыщения, и минимальный эффект, если добавленные ядра перейдут в капли в начале процесса.

Поскольку спектр ядер конденсации, из которых образуются капли, довольно узок, полученные результаты показывают, что возможности воздействия с помощью добавления новых ядер в существенной степени зависят от возможности получения достаточно монодисперсных аэрозолей и регулирования их размеров с целью повышения эффективности использования. Таким образом, математический эксперимент по воздействию на кинетику начальной стадии конденсации с помощью ядер показал, что воздействие такого рода в принципе возможно. Оно приводит к увеличению числа капель в облаке и к повышению его устойчивости. Техническое решение зависит от получения монодисперсных аэрозолей в больших объемах. Размер таких аэрозолей, создающий максимальный

эффект, при известном химическом составе может быть легко рассчитан. Из (7.3) имеем

$$\delta_{гр} = \left(\frac{k_4}{k_1} \frac{z}{z'} \right)^{\frac{1}{1+\alpha}} z'(\tau_{max}). \quad (12)$$

Если использовать связь между $\delta_{гр}$ и активностью ядра C , установленную в [1], т. е.

$$\delta_{гр} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{27C}{4B^3}}}. \quad (13)$$

при $B \approx 1,2 \cdot 10^{-7}$ см, то можно установить активность максимально эффективных ядер

$$C_{гр} \approx \frac{4B^3}{27} \left(\frac{k_4}{k_1} \frac{z}{z'} \right)^{\frac{2}{1+\alpha}} [z'(\tau_{max})]^{-2}. \quad (14)$$

Наконец, если известен состав ядра, то связь между r_0 — радиусом сухого ядра и его активностью может быть однозначно установлена. В частности, если придерживаться модели, предложенной в [1], согласно которой,

$$C = br_0^{2(1+\alpha)}, \quad (15)$$

где b и α некоторые параметры, то

$$r_0 = \left[\frac{4B^3}{27b [z'(\tau_{max})]^2} \left(\frac{k_4}{k_1} \frac{z}{z'} \right)^{\frac{2}{1+\alpha}} \right]^{\frac{1}{2(1+\alpha)}}. \quad (16)$$

Полученное соотношение показывает, что эффективный радиус ядер в силу зависимости от $z'(\tau_{max})$, k_1 и k_4 , определяется не только физико-химическими свойствами самого ядра, но и внешними параметрами и, в первую очередь, вертикальной скоростью v_v , функцией распределения естественных ядер и должен подбираться применительно к конкретному случаю.

В заключение отметим, что полученные результаты было бы чрезвычайно интересно проверить на небольшой экспериментальной установке в целях изучения возможности воздействия ядрами конденсации. Лишь после этого имеет смысл перейти к уточнению и развитию теории.

Автор благодарен И. Д. Шориновой за проведенные расчеты на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Л. М., Седунов Ю. С. Некоторые вопросы теории атмосферных ядер конденсации. Труды ИПГ, вып. 9, 1967.
2. Седунов Ю. С. Кинетика начальной стадии конденсации в облаках. Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, № 1, 1967.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ
Вып. 0(52) 1975 г.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИСКУССТВЕННЫМИ ЯДРАМИ КОНДЕНСАЦИИ НА РАЗВИТИЕ ОБЛАЧНОГО СПЕКТРА

Э. Э. АЛЕКСАНДРОВ, И. В. КЛЕПИКОВА

В [1] методом численного моделирования исследовалось влияние искусственных ядер конденсации на кинетику формирования спектра облачных капель и было показано, что путем введения сравнительно малого по массе количества искусственных гидроколических ядер можно существенно изменить микроструктуру формирующегося облака. При исследовании процесса поддействия искусственными ядрами конденсации, имеющими логарифмически-нормальное распределение по размерам с медианным радиусом 0,05 мкм и с различной дисперсией, была выявлена возможность как увеличения, так и уменьшения концентрации образующихся капель при изменении их размера.

Метод воздействия, основанный на использовании искусственных ядер конденсации, отличается высокой эффективностью, поскольку применяются частицы малого размера и весовой расход реагента лежит в разумных пределах — менее 1 мг на кубический метр воздуха или менее 1 г на кубический километр. Здесь и далее под эффективностью воздействия мы будем понимать возможность максимального изменения пересыщения или каких-либо параметров микроструктуры (концентрации капель, распределения их по размерам и т. п.) при минимальных весовых расходах реагента на единицу объема воздуха или облака. Учитывая возможную перспективность этого метода воздействия, исследования были продолжены. В частности, были изучено влияние медианного размера распределения искусственных ядер конденсации

В данной статье описываются результаты численных экспериментов по воздействию на формирование и развитие спектра облачных капель искусственными ядрами конденсации с меданным радиусом, изменяющимся в диапазоне от 0,05 до 2 мкм. Численная модель, с помощью которой проводились эксперименты, кратко описана в [1] и подробно рассмотрена в [4], поэтому здесь она не описывается.

1. Выбор параметров спектра ядер конденсации

Распределение искусственных ядер конденсации по размерам принято логарифмически-нормальным

$$f_{\text{я}} = \frac{A}{\sqrt{2\pi} \sigma_r r_0} \exp\left(-\frac{\ln^2 \frac{r_n}{r_0}}{2\sigma_r^2}\right) \quad (1)$$

где r_0 — медианный радиус распределения, $\sigma_r = \frac{s}{(\ln r_n - \ln r_0)^2}$ — дисперсия логарифмов радиусов, A — нормирующий множитель определяющий концентрацию ядер.

Выбор логарифмически-нормального распределения для искусственных ядер обусловлен тем, что этот тип распределения характерен как для конденсационных аэрозолей — ядер радиусом менее 1 мкм, так и для более крупных частиц, получаемых механическим измельчением.

Для выявления влияния размера искусственных ядер конденсации были исследованы распределения с медианными радиусами 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,5, 1 и 2 мкм. При этом с достаточно хорошим разрешением охватывается весь реально возможный диапазон размеров ядер. Ядра размером 0,005 мкм и менее при пересыщениях, наблюдаемых в атмосфере, будут оставаться сухими и не примут участия в процессе образования капель, а ядра крупнее 2 мкм в процессе конденсационного роста быстро достигнут размера, при котором скорость седиментации становится существенной, и выпадут из облака. Для оценки влияния ширины спектра ядер были рассмотрены распределения с σ_r , равным 0,2; 0,4 и 0,8. Хотя практически трудно получить аэрозоли с дисперсией менее 0,8, рассмотрение более узких распределений представляет известный интерес, поскольку именно для узких распределений, приближающихся к монодисперсным, можно ожидать [5] наибольшей эффективности. Влияние количества искусственных ядер проверено на вариантах с весовой концентрацией 0,01; 0,1 и 1 мг/м³. Эти величины были выбраны исходя из результатов модельных опытов в большой аэрозольной камере ИЭМ [3].

Было проведено 36 численных экспериментов по воздействию искусственными ядрами конденсации. Как и прежде, влияние искусственных ядер конденсации на процесс облакообразования исследовалось на фоне естественных ядер, для которых было принято обратнотемпературное распределение по размерам

$$f_{\text{об}} = ar_c^{-1} \quad (2)$$

Показатель степени γ был принят равным 4, а нормирующий множитель $a = 1,6 \cdot 10^{-12}$, что соответствует массовой концентрации ядер конденсации 13 мкг/м³ при минимальном их размере 10^{-2} см и максимальном 10^{-8} см.

Как искусственные, так и естественные ядра конденсации приняты полностью растворимыми и состоящими из хлористого натрия. Моделируемая скорость подъема воздуха во всех вариантах была постоянной и равной 30 см/с.

2. Обсуждение результатов

Искусственные ядра конденсации влияют на различные характеристики облака: влажность пересыщения, размер и концентрацию капель, видимость в облаке, а в некоторых случаях и на термодинамику процесса. Для удобства рассмотрим влияние искусственных ядер на разные параметры облака отдельно.

2.1. Влияние искусственных ядер конденсации на пересыщение

Раузер [1] была показала, что введение дополнительных искусственных ядер конденсации приводит к снижению величины пересыщения, не изменяя качественно его временной ход. Таким при введении достаточно большого по массе количества ядер отток пара на них становится большим и пересыщение снижается настолько сильно, что вместо облака с характерным «капельным» спектром частиц образуется стабильная мелкокапельная система типа дымки. Этот эффект был назван «перезацево» по аналогии с явлением, наблюдаемым при воздействии на переохлажденные облака и туманы.

Проведенное исследование процесса воздействия искусственными ядрами, параметры распределения которых изменяются в широком диапазоне, подтвердило эти предварительные выводы. Очень характерным оказалось влияние параметров распределения искусственных ядер и их количества на величину максимального пересыщения (рис. 1).

Зависимость максимального пересыщения от медианного радиуса распределения искусственных ядер при постоянных значениях дисперсии спектра ядер и их массы характеризуется наличием минимума. Особенно четко этот эффект проявляется на узких спектрах ядер ($\sigma_1 = 0,2$). При увеличении медианного радиуса поток пара на искусственные ядра в связи с понижением их концентрации при заданной массе вводимых ядер уменьшается и при медианном радиусе 2 мкм и более становится пренебрежимо малым по сравнению с потоком пара на естественные ядра. С другой стороны, в случае достаточно малых значений медианного радиуса при существующих пересыщениях искусственные ядра вообще не будут активироваться и превращаться в капли, поток пара на них будет мал, и максимальное пересыщение будет снижаться незначительно. Таким образом, с точки зрения снижения величины максимального пересыщения, в процессе облакообразования существуют некоторые оптимальные параметры спектра искусственных ядер. При $\sigma_1 = 0,2$ (рис. 1 а) наиболее эффективны ядра с медианным радиусом от 0,1 до 0,2 мкм: при увеличении диспер-

слия спектра ядер до $\alpha_1 = 0,4$ (рис. 1 б) оптимум r_i сдвигается в область 0,05—0,15 мкм. При широком спектре (рис. 1 в) оптимум сдвигается в область еще более низких значений медянного радиуса.

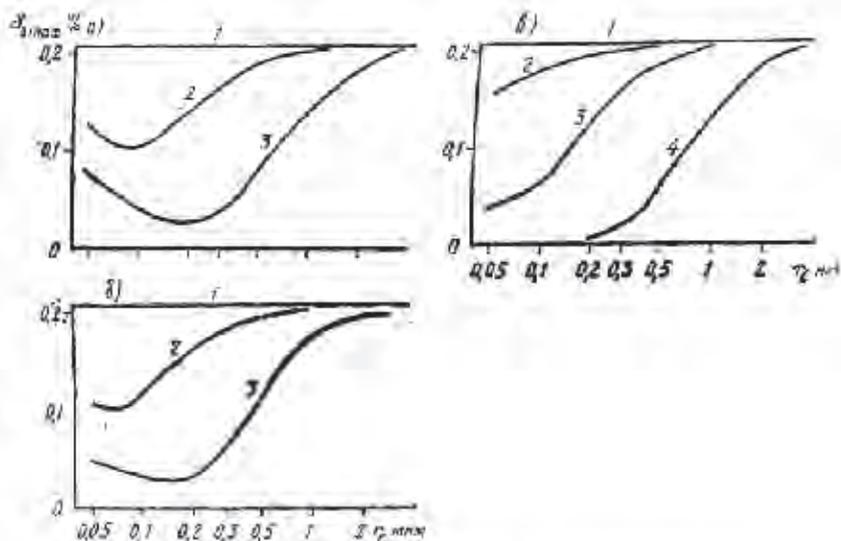


Рис. 1. Зависимость максимального пересыщения от величины медянного радиуса r_i искусственных ядер, введенных в количестве 0,01 мг/м³ (1), 0,1 мг/м³ (2) и 1 мг/м³ (3) и 10 мг/м³ (4):

$\alpha = \alpha_1 = 0,2$ а — $\alpha_1 = 0,4$, в — $\alpha_1 = 0,6$, r — значение максимального пересыщения для фоновой оплоты (без введения)!

Следует особо отметить, что степень понижения максимального пересыщения при введении равной массы ядер и при оптимальном сочетании дисперсии и медянного радиуса примерно одинакова, причем при сужении спектра ядер оптимальное значение медянного радиуса увеличивается. Отсюда можно сделать важный вывод, что если ставится задача наибольшего сближения максимального пересыщения, нет необходимости стремиться получить максимально узкий спектр искусственных ядер. Гораздо важнее выбрать оптимальный набор параметров распределения. Отклонения от оптимального сочетания параметров распределения можно компенсировать только увеличением массы вводимых ядер.

2.2. Влияние искусственных ядер конденсации на распределение капель по размерам

Процесс формирования микроструктуры естественных облаков в основных чертах известен [6] и заключается в том, что по ме-

ре увеличения пересыщения от нуля до максимального значения капли, выросшие на наиболее активных (крупных) ядрах, получают возможность неограниченного роста, а более мелкие частицы обгаются в равновесном состоянии и мало изменяют свой размер во времени. Этот процесс сопровождается появлением и углублением на функции распределения минимума, разделяющего спектр частиц на две качественно различные части: облачные капли и обводненные ядра конденсации.

В присутствии искусственных ядер конденсации процесс формирования спектра облачных капель может существенно изменяться и приводить к распределениям, иногда отличающимся от «фоновых». В результате проведенных расчетов удалось выделить четыре характерных типа распределения облачных капель (рис. 2). Все эти распределения приведены для высоты 110 м над

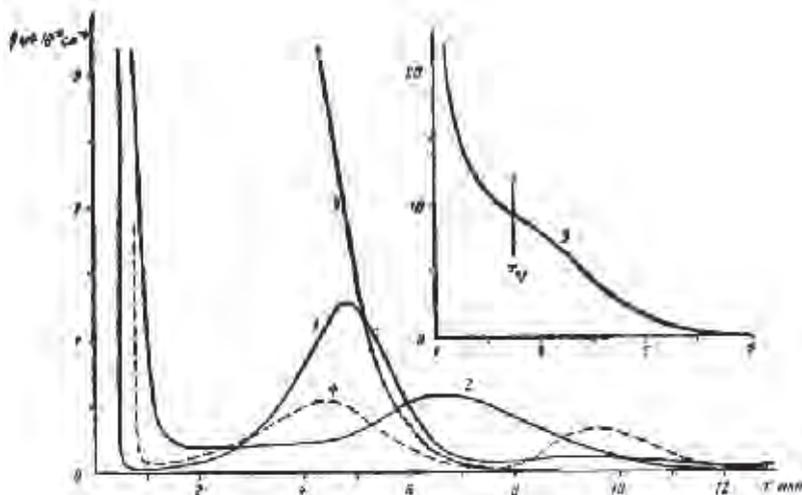


Рис. 2. Эволюция распределения частиц по размерам, полученные при делении искусственных ядер, $M_1 = 0,1 \text{ мг/м}^3$:

$$1 - r_1 = 0,5 \text{ мкм}, \quad \sigma_1 = 0,4; \quad 2 - r_1 = 0,3 \text{ мкм}, \quad \sigma_1 = 0,4; \quad 3 - r_1 = 0,1 \text{ мкм}, \quad \sigma_1 = 0,4; \\ 4 - r_1 = 0,5 \text{ мкм}, \quad \sigma_1 = 0,7$$

уровнем конденсации, определяемым по сухой адиабате, т. е. без учета оттока пара на обводнение ядер конденсации. Масса введенных искусственных ядер во всех случаях одинаковая и равна $0,1 \text{ мг/м}^3$.

Распределение 1 ($r_1 = 0,5 \text{ мкм}$, $\sigma_1 = 0,4$) по виду наиболее близко к фоновым распределениям. Оно характеризуется достаточно

глубоким минимумом в области радиусов капель 0,7–0,9 мкм, однако концентрация капель ниже фоновой примерно на 60%, а средний размер облачных капель и дисперсия распределения соответственно больше. Распределение 2 соответствует случаю воздействия более мелкими ядрами конденсации ($r_1 = 0,3$ мкм, $\sigma_1 = 0,4$). Это распределение значительно отличается от фоновое прежде всего слабо выраженным протяженным максимумом и отсутствием четко выраженной границы между обводненными ядрами и облачными каплями. Максимум распределения в области облачных капель сильно размыт. Концентрация облачных капель в этом случае также понижена по сравнению с фоновой и близка к концентрации для распределения 1. Дальнейшее уменьшение модального радиуса искусственных ядер до 0,1 мкм при той же дисперсии их распределения $\sigma_1 = 0,4$ (кривая 3) приводит к тому, что максимум распределения в области облачных капель исчезает полностью и вид распределения становится близким к обратному. В данном случае на кривой распределения хаявтерной границы между облачными каплями и обводненными ядрами нет и ее можно провести только условно, например, исходя из понятия граничного радиуса $r_{гп}$ [2,5]. На рис. 2 в более мелком масштабе приведена также кривая 3 с указанием положения граничного радиуса, зависящего от текущего значения пересыщения. Концентрация облачных капель ($r > r_{гп}$) в этом случае примерно в два раза выше, чем в фоновом.

В дальнейшем случае, когда на кривой распределения нет минимума, разделяющего обводненные ядра и облачные капли, мы будем называть пересыщением. Следует иметь в виду, что явление пересыщения является динамическим и его дальнейшее существование зависит от времени хода пересыщения. Если поток пара, охлаждающийся в результате охлаждения воздуха, будет достаточно велик, то в области граничного радиуса может сформироваться минимум функции распределения, а правее – максимум в области облачных капель. Некоторые тенденции к такому процессу прослеживаются на кривой 3 рис. 2. При недостаточном притоке пара пересыщение будет снижаться, граничный радиус увеличивается (при $\delta_0 = 0$, $r_{гп} = \infty$), а число облачных капель будет уменьшаться, что, в свою очередь, приведет к более быстрому росту оставшихся капель и появлению минимума функции распределения. Кривые распределения, аналогичные типу 3, наблюдаются всегда на начальной стадии процесса формирования спектра облачных капель, когда пересыщение больше нуля, но не достигло еще максимального значения, поэтому об эффекте пересыщения можно говорить только в случае достаточно большого времени, когда в естественном процессе пройден максимум пересыщения и четко сформировался спектр облачных капель.

Большой интерес представляет формирование в результате воздействия бимодальных спектров облачных капель. Слабо выраженная вторая мода заметна на кривой 1 в области 10 мкм, но особенно характерна она на кривой 4, соответствующей случаю

воздействия ядрами с $r_1 = 0,5$ мкм и $\sigma_1 = 0,2$. Один максимум на кривой f ($r \approx 9,5$ мкм) соответствует каплям, выросшим на крупных искусственных ядрах, а второй максимум ($r \approx 4,5$ мкм) — каплям, выросшим на более мелких естественных ядрах. Бимодальность в той или иной степени проявляется при воздействии достаточно крупными ядрами ($r_1 > 0,3$ мкм) с узким распределением по размерам ($\sigma_1 \leq 0,4$). Этот эффект важен в том отношении, что большое различие в размерах двух групп капель должно приводить к существенному ускорению гравитационной коагуляции, к ускорению формирования осадков и к рассеянию облака.

Приведенные данные показывают возможность весьма существенных изменений распределения облачных капель по размерам, однако, как и для рассмотренного в предыдущем разделе влияния на пересыщение, результат воздействия существенно зависит от параметров распределения искусственных ядер по размерам.

2.3. Влияние искусственных ядер конденсации на концентрацию облачных капель

Одной из наиболее важных микроструктурных характеристик является концентрация облачных капель. Изменения распределения облачных капель по размерам приводят и к изменениям концентрации. Зависимость концентрации облачных капель от параметров спектра искусственных ядер конденсации приведена на рис. 3 в виде изолиний отношения N/N_0 , где N и N_0 — концентрации капель, полученные при воздействии и в отсутствие искусственных ядер соответственно. Результаты показывают, что путем введения искусственных ядер конденсации можно как увеличивать, так и уменьшать концентрацию капель в образующемся облаке. Степень изменения концентрации в основном зависит от массы вводимых ядер. Так, при массе $0,01$ мг/м³ (рис. 3а) можно изменить концентрацию в ту или иную сторону в два раза, а при массе искусственных ядер $0,1$ мг/м³ (рис. 3б) возможно четырехкратное изменение концентрации.

Пунктирной линией на рис. 3 показано оптимальное значение одного из параметров спектра искусственных ядер при фиксированном значении второго параметра. Оптимум выбран из максимального снижения концентрации облачных капель. Сравнение рис. 3а и 3б показывает, что концентрация облачных капель сильно зависит от всех трех параметров логарифмически-нормального распределения облачных ядер. Отсюда следует интересное явление, с которым, возможно, придется столкнуться при проведении натурных опытов по воздействию искусственными ядрами конденсации. Поскольку в реальных условиях введение искусственных ядер осуществляется в виде точечного или линейного источника, то по мере удаления от места введения концентрации искусственных ядер конденсации будут уменьшаться. При определенных значениях медианного радиуса и дисперсии распределения (например, $r_1 = 0,15$ мкм и $\sigma_1 = 0,3$ — крестик на рис. 3) и при достаточно

большом количестве введенных ядер (порядка 1 мкг/м^3) в месте воздействия концентрация капель будет увеличена по сравнению с фоновой (рис. 3 б). По мере удаления от места воздействия концентрация капель будет уменьшаться до уровня фоновой, затем достигнет некоторого минимума (рис. 3 а) и опять начнет увеличиваться, асимптотически приближаясь к фоновой.

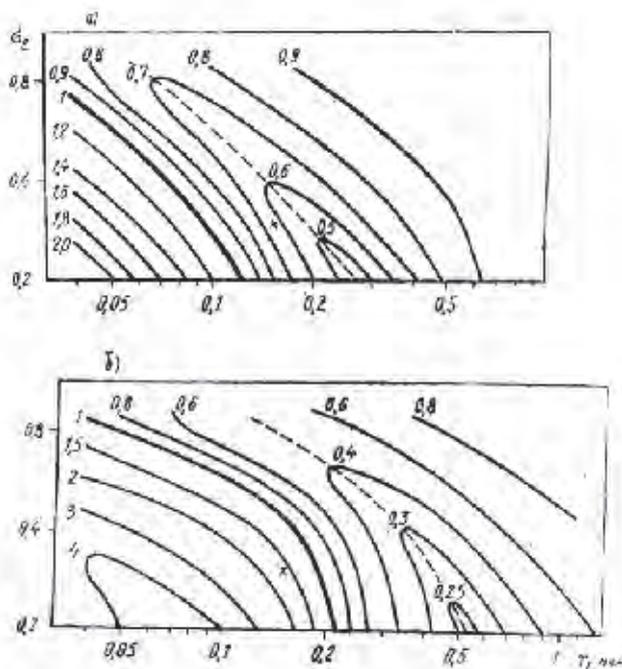


Рис. 3. Изолинии равных значений отношения концентраций капель $\frac{N}{N_{\phi}}$ на высоте 110 м над уровнем конденсации в зависимости от параметров спектра искусственных ядер:
 а - $M = 0.01 \text{ мкг/м}^3$; б - $M = 0.1 \text{ мкг/м}^3$

Приведенные на рис. 3 данные еще раз показывают отмеченную выше высокую чувствительность достигнутого эффекта от параметров спектра искусственных ядер конденсации. На рис. 3 не отражены области пересечения. Этот эффект, как уже отмечалось, имеет место при сравнительно высоких концентрациях вводимых искусственных ядер, и область его существования предполагается исследовать в дальнейшем.

2.4. Влияние искусственных ядер конденсации на видимость в облаке.

Изменение распределения капель по размерам под действием искусственных ядер конденсации с неизбежностью должно влиять и на ослабление света (видимость) в облаке. С целью выявления и оценки этого эффекта для полученных в численных экспериментах распределений был рассчитан объемный коэффициент ослабления света. Поскольку при воздействии всегда присутствует большое количество мелких обводненных ядер, расчет проводился по формуле Ван де Хюлста с поправочным множителем Дейрменджана. Вычисления проведены для длины волны 0,55 мкм, соответствующей максимуму чувствительности человеческого глаза; реальная часть показателя преломления принята равной 1,33, а мнимая — нулю.

На начальной стадии процесса при относительной влажности воздуха менее 100% коэффициент ослабления света при добавлении искусственных ядер всегда выше фонового. Однако после достижения уровня конденсации и начала формирования спектра облачных капель временной ход коэффициента ослабления существенно зависит от количества и параметров распределения искусственных ядер.

На рис. 4 приведены линии равных значений отношения $\left(\frac{\sigma}{\sigma_{\phi}}\right)$ коэффициента ослабления при воздействии (σ) к коэффициенту ослабления в фоновом опыте (σ_{ϕ}) или соответственно обратного отношения метеорологических дальностей видимости. Этот рисунок подобен рис. 3, на котором приведены изолинии относительных концентраций. Прежде всего обращает на себя внимание возможность улучшения видимости в облаке, причем увеличение количества вводимых искусственных ядер сопровождается дальнейшим улучшением видимости. Этот факт объясняется тем, что на сравнительно небольшом по числу (хотя и значительном по массе) количестве искусственных ядер конденсируется весь освобождающийся при охлаждении воздуха пар, а процесс активации естественных ядер существенно подавлен. Как правило, спектр облачных капель при этом бимодальный, подобно спектру 4 на рис. 2.

Уменьшение медианного радиуса искусственных ядер приводит при сохранении массы к значительному увеличению их счетной концентрации и к ухудшению видимости. Естественно, что наибольшее ухудшение видимости должно наблюдаться в зоне пересева. В данном случае также наблюдается очень сильная зависимость получаемого эффекта от количества искусственных ядер и от параметров их распределения.

Степень изменения видимости при воздействии ядрами конденсации примерно в полтора раза меньше, чем степень изменения

концентрации облачных капель. Это объясняется тем, что в первом приближении видимость определяется вторым моментом распределения капель по размерам, а концентрации — нулевым. Видимость, определяемая третьим моментом, под действием искус-

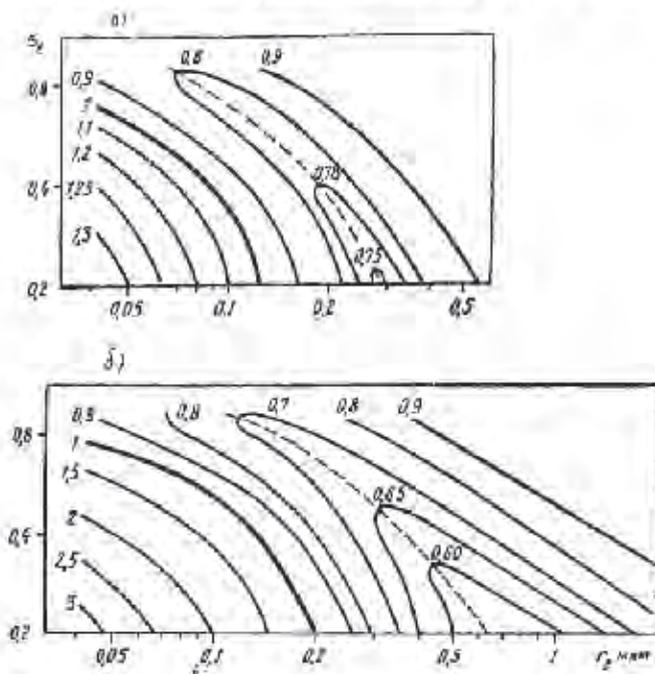


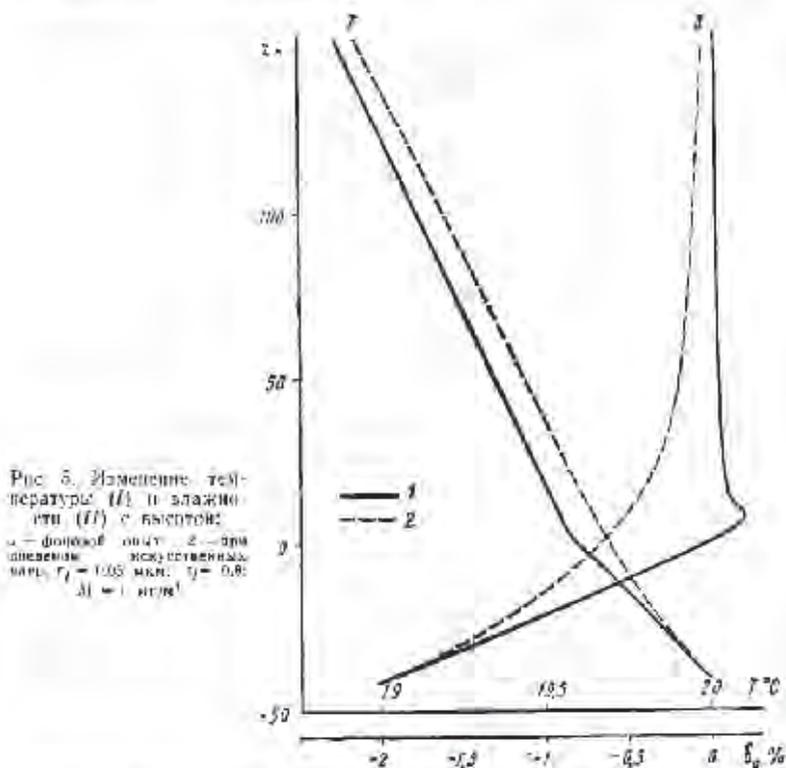
Рис. 4. Изобилие равных значений отношения коэффициентов ослабления $\frac{S_2}{\alpha\beta}$ на высоте 110 м над уровнем конденсации в зависимости от параметров спектра искусственных ядер: $\alpha = M = 0,01$ мкм³, $\beta = M = 0,1$ мкм³.

ственных ядер конденсации будет изменяться незначительно, поскольку она обусловлена термодинамикой процесса.

2.5. Влияние искусственных ядер конденсации на термодинамику процесса облакообразования

Конденсация воды на ядрах конденсации, начинающаяся при относительной влажности воздуха существенно меньше 100%, не может не влиять на высотный ход температуры и влажности воздуха, а через них и на динамику процесса. Если в атмосфере присутствуют только естественные ядра конденсации, концентрация которых обычно мала (за исключением смога и других аномаль-

ным случаем), то поток пара на обводняющиеся ядра мал и практически не влияет на тепловой режим атмосферы. При этом вплоть до уровня конденсации температура понижается с сухадиабатическим градиентом, а выше уровня конденсации устанавливается влажноадиабатический градиент. Переход при этом плавный и не сопровождается изломом хода температуры и влажности, что обусловлено существованием области переувлажнения. Такой типичный высотный ход температуры и влажности воздуха в фоновом варианте (1) показан на рис. 5. За нулевой уровень высоты по оси ординат на этом рисунке принята высота уровня конденсации, рассчитанная по сухой адиабате.



Иначе обстоит дело при введении достаточно больших количеств искусственных ядер конденсации. На рис. 5 показан также ход температуры и влажности воздуха при воздействии искусственными ядрами конденсации с $r_1 = 0,05$ мкм и $\sigma = 0,8$ в количестве 1 мкг/м^3 . Важным отличием от естественного процесса является

ся отсутствие четкого перехода от сухадиабатического к влажнодиабатическому градиенту температуры. Даже при относительной влажности воздуха менее 100% ($\delta_0 < 0$) поток пара на обводняющиеся ядра конденсации настолько велик, что выделяющаяся теплота конденсации заметно повышает температуру воздуха. На уровне конденсации ($\delta_0 = 0$) температура воздуха путем введения искусственных ядер может быть повышена примерно на 0,1°C, и это превышение сохраняется до высоты 200 м и более. Такое повышение температуры воздуха может привести к появлению доподлинной плавучести и развитию конвекции. Хотя на высотах от 0 до 100 м увеличение плавучести вследствие повышения температуры воздуха частично компенсируется понижением его влажности, однако на больших высотах различия во влажности уменьшаются, а некоторый перегрев воздуха сохраняется.

ВЫВОДЫ

Анализ результатов численных экспериментов по воздействию искусственными ядрами конденсации на развитие облачного спектра показывает, что этот метод воздействия является достаточно эффективным. Введением искусственных ядер конденсации можно увеличить или уменьшить концентрацию капель в образующемся облаке. В исследуемом диапазоне изменения параметров искусственных ядер концентрация капель увеличивается и уменьшается максимально в четыре раза. Важной является и возможность двух- трехкратного уменьшения или увеличения метеорологической дальности видимости в облаке. В ряде случаев при воздействии можно получить бимодальные распределения облачных капель по размерам и тем самым инициировать и стимулировать развитие в облаке коагуляционных процессов. Возможна и стабилизация облака путем превращения его в мелкокапельную систему типа дымки. Все эти изменения в микроструктуре облака происходят вследствие снижения пересыщения и процесса облакообразования и перераспределения потоков пара между естественными и искусственными ядрами конденсации.

Путем введения достаточно большого количества искусственных ядер конденсации можно добиться и некоторого повышения температуры воздуха, что может быть использовано для инициирования или интенсификации конвективных движений в атмосфере.

Важным является вывод о возможности появления при воздействии зон с повышенной и пониженной концентрацией облачных капель и соответственно с уменьшенной и увеличенной дальностью видимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Александров Э. Л., Клевиков Н. В. О влиянии искусственных ядер конденсации на кинетику формирования спектра облачных капель. — «Труды ИЭМ», 1974, вып. 8(46), с. 42—55.

2. Александров Э. Л., Левин Л. М., Седунов Ю. С. К вопросу о конденсационном росте капель на гигроскопическом ядре. — «Труды ИПГ», 1967, вып. 9, с. 47—56.
3. Александров Э. Л., Ясевич Н. П. Результаты предварительных опытов по воздействию на туман в камере ядрами конденсации. — «Труды ИЭМ», 1971, вып. 20, с. 44—51.
4. Клепикова Н. В., Седунов Ю. С. Кинетика образования капельного спектра на начальной стадии конденсации. — «Труды ИЭМ», 1973, вып. 3(37), с. 61—74.
5. Седунов Ю. С. Численные эксперименты по воздействию на кинетику формирования облачного спектра путем введения дополнительных ядер конденсации. — «Труды ИЭМ», 1969, вып. 6, с. 3—9.
6. Седунов Ю. С. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. Л., Гидрометеоиздат, 1962. 207 с.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ
ЛЬДООБРАЗУЮЩИХ АЭРОЗОЛЕЙ
И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕКОТОРЫХ УСЛОВИЙ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЫХОД АКТИВНЫХ ЯДЕР**

С. П. Белнев, Н. С. Ким

В Советском Союзе масштабы воздействия на переохлажденные, в частности градоопасные, облака быстро расширяются. Это привело к интенсификации исследований по изысканию

новых эффективных реагентов для замены дефицитного AgI или токсичного PbI_2 и к необходимости разработки новых типов генераторов льдообразующих аэрозолей. В связи с этим возникла потребность всесторонних испытаний как реагентов, так и генераторов. Одной из основных характеристик льдообразующих реагентов и генераторов в целом, определяемых в таких испытаниях, является количество η активных при данной температуре переохлажденного облака частиц, которые образуются из одного грамма реагента, диспергированного в генераторе (эффективность выхода ядер).

Согласно результатам многочисленных работ, достаточно полный обзор которых приведен в [3, 6], данные о величине η для AgI , полученные в разных экспериментах, значительно отличаются друг от друга. Эти расхождения достигают нескольких порядков величины.

До недавнего времени разброс экспериментально измеренных значений η связывали главным образом с различными методами, применяемых разными авторами, а также с различиями физико-химических свойств комплексных AgI , таких, как $\text{AgI}-\text{NaI}$, $\text{AgI}-\text{NH}_4\text{I}$ и др. В последние годы группой советских авторов [3] было убедительно показано, что большие расхождения в величинах выхода η вызваны в первую очередь тем, что в разных работах изучались аэрозоли с различными дисперсными составами. Действительно, величину η можно определить как

$$\eta = N \int_0^{\infty} z(r) f(r) dr, \quad (1)$$

где N — общее число частиц, образующихся из 1 г AgI ; $f(r)dr$ — функция распределения частиц по размерам; $z(r)$ — вероятность образования ледяного кристалла на частице, имеющей радиус r . Вид функции $z(r)$ зависит от размеров частиц, физико-химических свойств вещества и температуры активации льдообразующих частиц. Поскольку

$$N = \frac{V_0}{\frac{4}{3}\pi \int_0^{\infty} r^3 f(r) dr}, \quad (2)$$

где V_0 — объем, занимаемый 1 г AgI , то из (1) следует, что при прочих равных условиях величина η очень сильно зависит от функции распределения частиц по размерам, т. е. от дисперсности исследуемого аэрозоля. Однако, если факт влияния дисперсности аэрозоля на величину η достаточно хорошо установлен, то причины, приводящие к изменению размеров частиц при работе генераторов в реальных условиях, в настоящее время до конца еще не изучены. Поэтому большой разброс значений

η , полученных экспериментально, указывает на возможность оптимизации режимов генерации льдообразующих аэрозолей с целью получения максимальной эффективности действия генератора. Для проведения такой оптимизации необходимо выявить основные параметры, определяющие дисперсность аэрозоля, образующегося при работе генератора, и оценить влияние этих параметров на величину η .

С другой стороны, остаются невыясненными пути и способы использования данных об эффективности действия (величине η) генераторов льдообразующих аэрозолей, полученных в модельных экспериментах, для оценки работы полноразмерного генератора в реальных условиях воздействия, так как неизвестны критерии моделирования процесса формирования льдообразующих частиц.

Расчетная модель для описания процесса генерации льдообразующих частиц

Решение поставленных задач возможно только при правдивом представлении физической картины процесса формирования льдообразующих частиц в условиях реального воздействия. В связи с этим рассмотрим и попытаемся математически описать работу пиротехнического генератора (типа ракеты «Алазань») в момент его полета в облаке.

Процесс образования высокодисперсных льдообразующих частиц происходит в два этапа. На первом этапе в камере сгорания ведется возгонка реагента в парообразное состояние, затем струя разогретого газа, содержащего пары активного вещества, истекает из сопла генератора. При смещении этой горячей струи с внешним холодным воздухом происходит охлаждение и разбавление паров с последующей их конденсацией и образованием аэрозольных частиц. Этот процесс является процессом конденсации сильно пересыщенных паров, который неоднократно рассматривался в литературе [6, 8, 9, 11]. Поэтому, не останавливаясь на детальном обсуждении теории вопроса, укажем, что конденсацию паров иодистого серебра можно математически приближенно описать уравнениями, полученными, например, в [11]:

$$\frac{db_0}{dt} = -b_0 \sum_i K(0, i) b_i, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{db_i}{dt} = & -K(i, i) b_i^2 - K(i, i-1) b_i b_{i-1} - b_i \sum_j K(i, j) b_j + \\ & + \frac{1}{2} K(i-1, i-1) b_{i-1}^2 + 0,75 K(i-1, i-2) b_{i-1} b_{i-2} + \\ & + b_i \sum_{i < i-2} 2^{i-i} K(i, i) b_i. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь b — текущая концентрация частиц, состоящих из 2^i молекул; t — время. Коэффициенты $K(i, j)$ имеют ту же размерность, что и константа коагуляции, и записываются в виде обычного выражения константы коагуляции [10].

Конденсация паров льдообразующего реагента при работе полноразмерного генератора обычно происходит в условиях его полета через относительно неподвижную атмосферу. Поэтому для расчета этого процесса необходимо уравнения (3), (4) дополнить уравнением кинетики разбавления струи пара, выходящей из сопла генератора, внешним холодным воздухом.

Для случая когда струя горячего газа, вытекающая из сопла генератора радиуса R_0 , имеющая начальную скорость u_0 , температуру T_1 , обдувается внешним потоком с соответствующими параметрами u_2 и T_2 , нами было получено выражение для коэффициента q_2 разбавления горячих газов внешним холодным воздухом на оси зоны смешения в любой момент времени t . Не приводя подробных выкладок, укажем, что q_2 записываются в неявном виде с помощью следующих выражений:

$$\frac{K_1 R_0}{u_1 m} \left[q_2 - \frac{1-m}{m} \ln |1 + m q_2| \right] = t, \quad (5)$$

$$K_1 = \frac{8,5}{34 m \Theta D \left[\frac{1-m-m_*}{m_*} \sqrt{\Theta} + 2(1-m) F \right]}, \quad (6)$$

где $m = u_2 / u_1$; $\Theta = T_1 / T_2$; D — безразмерный коэффициент, учитывающий турбулентность внешнего воздуха, а также конструктивные особенности генератора; m_* , F — константы, определяемые графически по данным [4].

С помощью уравнения (5) кинетику смешения двух потоков можно численно решить систему уравнений (3), (4), т. е. определить изменение во времени функции распределения по размерам и общего количества образовавшихся частиц для каждого конкретного случая при известной функции $v(t)$.

Результаты численных расчетов приведены и обсуждены вместе с экспериментальными результатами в последнем разделе.

Экспериментальная методика и аппаратура

Анализ уравнений (3)–(5) позволяет выделить основные параметры, влияющие на решение системы уравнений (3), (4), т. е. параметры, которые могут определять функцию распределения по размерам образовавшихся активных частиц. Ими являются: начальная концентрация n_0 молекул пара активного вещества; отношение m скорости движения генератора к скорости истечения газовой струи из сопла генератора; отношение Θ начальной температуры горячей струи к температуре окру-

жающего воздуха, безразмерный коэффициент D турбулентной диффузии, на величину которого могут влиять геометрические характеристики генератора. Величина этих параметров определяется внешними условиями движения генератора (m, D) и начальными условиями в газовой струе (дл, Θ).

Как показали результаты численных решений уравнений (1), (3), (4) для случая работы реальных генераторов, размер частиц τ , следовательно, величина выхода η очень сильно зависят от перечисленных выше параметров. Существенные этой зависимости определяет общие требования к методике корректных испытаний генераторов. Во-первых, поскольку формирование аэрозоля происходит в зоне смешения, характеристики которой определяются условиями движения генератора в облаке, то необходимо аэродинамическое моделирование определяющих параметров в модельных условиях должны быть такими же, как и для реального генератора. Во-вторых, поскольку дисперсность является важной характеристикой льдообразующих аэрозолей, то в последующих необходим контроль за размером образующихся частиц.

Нами была разработана методика исследования эффективности действия генераторов льдообразующих аэрозолей [4, 1], удовлетворяющая перечисленным требованиям. Стендовая установка, схематично показанная на рис. 1, создана на базе горизонтальной аэродинамической трубы, имеет систему для отбора и разбавления представительной пробы аэрозоля, камеры пересохнувшего тумана для проявления и регистрации активных ядер, аппаратуру для определения дисперсного состава аэрозоля.

Сама методика испытаний заключается в следующем. При работе полноразмерного генератора 1 в воздушном потоке рабочей части аэродинамической трубы образуется шлейф аэрозоля, который втягивается в расширяющуюся часть трубы и с помощью специальных турбулизаторов перемещается. На расстоянии около 8 м от генератора вниз по потоку с помощью воздушной подушки 5 через заборную трубку 2 аэрозоль непрерывно протягивается в магистраль 4. Для разбавления концентрации аэрозоля до заданной величины между заборной трубкой и магистралью установлен несселективный разбавитель 3. Из магистрали аэрозоль отбирается и определяется в двух заборных камерах 6 емкостью 2 л каждая, откуда небольшие по объему пробы аэрозоля вводятся в камеры 9 с переохлажденным туманом. Здесь льдообразующие частицы проявляют свою активность, образуя ледяные кристаллы, которые затем регистрируются. По числу образовавшихся кристаллов можно судить об эффективности действия генератора. Средняя квадратическая ошибка определения величины выхода по данной методике составляет $\pm 35\%$.

Для измерения среднего размера активной фракции аэрозолей была разработана новая методика [2], основанная на хорошо известном диффузионно-динамическом методе [7]. Он является косвенным методом и заключается в измерении осаждения аэрозольных частиц под действием броуновской диффузии в канале с заданными геометрическими характеристиками. При этом доля частиц, осевших на стенках канала, однозначно определяется средним размером этих частиц.

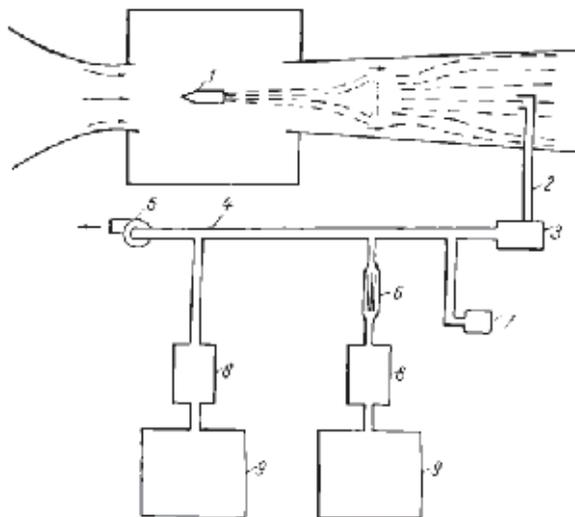


Рис. 1. Схема аппаратуры для испытания генераторов льдообразующих аэрозолей.

1 — генератор, 2 — заборная трубка, 3 — разбавитель конденсации, 4 — магистраль, 5 — воздушная линия, 6 — диффузионная батарея, 7 — терморегулятор, 8 — заборная камера, 9 — камера дождя.

Для измерения концентрации именно активных частиц на входе и выходе из каналов были использованы камеры переохлажденного тумана. Такая модификация диффузионно-динамического метода позволила нам измерять средний размер только активных частиц, поскольку неактивные частицы в переохлажденном тумане не образуют ледяных кристаллов и в измерениях автоматически не учитываются.

Для сравнения с помощью электронного микроскопа были проведены измерения размеров частиц, образующихся при горении пиротехнического состава с 2% AgI. С другой стороны, по формуле (1) проводилась расчетная оценка среднего размера частиц по результатам измерения величины η при минимальной температуре переохлажденного тумана (около -25°C)

с учетом того, что при низких температурах $\epsilon(r) \approx 1$. На рис. 2 приведены результаты оценки и измерений тремя методами. Здесь по оси абсцисс отложен средний радиус частиц, полученный из расчетных оценок, по оси ординат — средний радиус,

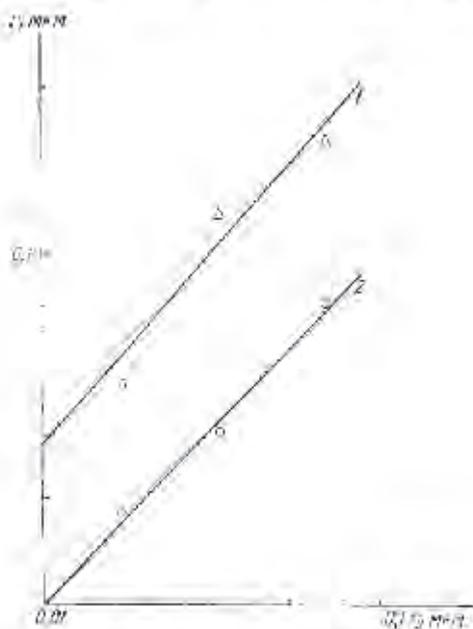


Рис. 2. Сравнение результатов измерения (r_1) электронным микроскопом (1) и диффузионным методом (2) с расчетными оценками (r_2) среднего радиуса частиц.

измеренный диффузионным методом и электронным микроскопом. Из рисунка следует, что электронный микроскоп дает достоверные, сильно завышенные результаты.

Результаты и обсуждение

Для выявления характера зависимостей величины выхода от определяющих процесс параметров были проведены численные решения системы уравнений (1)–(6). В качестве начальных условий для решения уравнений принимались условия, имеющие место при работе пиротехнических генераторов дымообразующих аэрозолей нитристого серебра. Величина $\epsilon(r)$ выбиралась путем аппроксимации экспериментальных результатов [3]

и наших данных. Все расчеты выполнялись на ЭВМ ЕС-1050. С другой стороны, для проверки правильности выводов разработанной теории по описанной выше методике экспериментально исследовалась эффективность действия некоторых типов полно-размерных генераторов, содержащих составы с 2 и 40% AgI.

На рис. 3 показаны зависимости среднего геометрического радиуса частиц, образующихся при работе генератора, от параметров m и n_0 . Параметры m и n_0 оказывают самое существенное влияние на средний размер частиц. Так, согласно расчетам, при $n_0 = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (2% AgI) увеличение m от 0,41 до

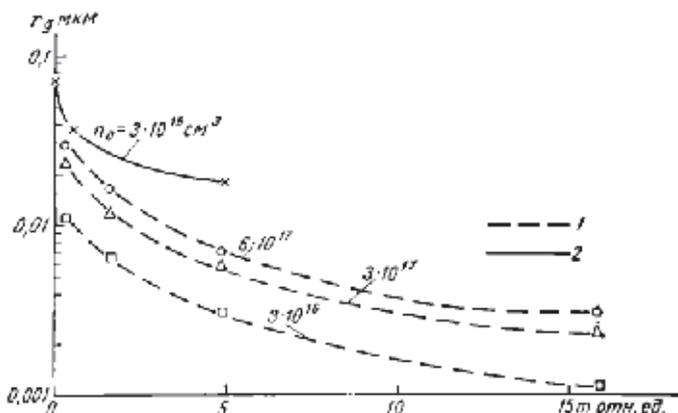


Рис. 3. Зависимость среднего геометрического радиуса частиц (r_g) от m при разных n_0 .
1 — расчетные данные, 2 — экспериментальные данные для состава с 2% AgI.

16,6 приводит к уменьшению среднего геометрического радиуса частиц от 0,011 до 0,0011 мкм. Сравнение расчетных кривых на рис. 3 показывает, что уменьшение параметра n_0 приводит к уменьшению среднего размера частиц, причем это уменьшение примерно пропорционально корню кубическому из изменения концентрации n_0 .

Такая зависимость среднего радиуса частиц от отношения m и начальной концентрации n_0 легко объясняется. Действительно, увеличение параметра m , т. е. увеличение скорости обтекания генератора потоком воздуха или же уменьшение скорости истечения газовой струи, приводит к более быстрому разбавлению концентраций пара активного вещества и концентрации сформировавшихся частиц, что замедляет скорость их роста за счет взаимных столкновений. Вследствие этого частицы вырастают до меньших конечных размеров, чем в случае меньших значений m .

Аналогичное влияние на размеры частиц оказывает и начальная концентрация конденсирующейся примеси, поскольку при прочих равных условиях увеличение концентрации приводит к увеличению количества взаимодействий между частицами и, следовательно, к увеличению конечного среднего размера частиц.

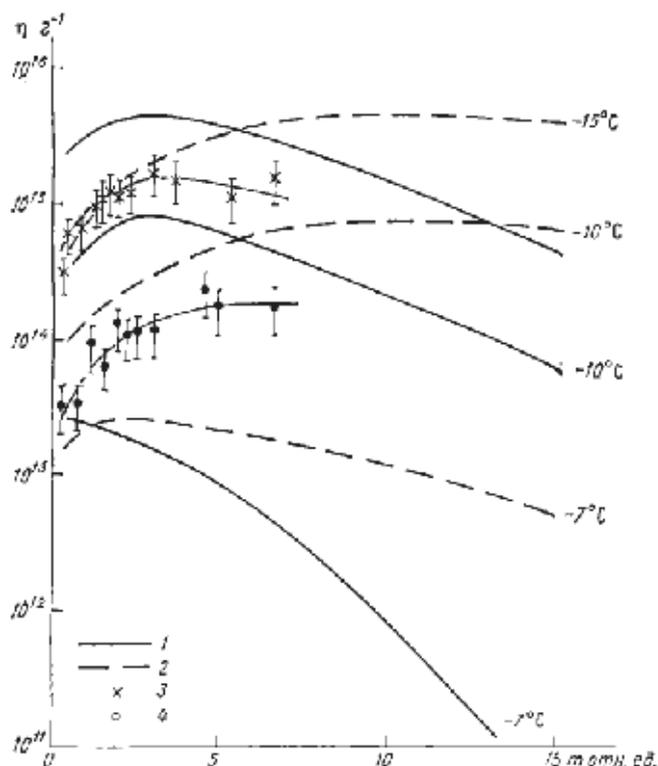


Рис. 4. Зависимость количества активных частиц из 1 г AgI от параметра m .

1 — расчетные данные при $\lambda_0 = 3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$ (2% AgI), 2 — при $\lambda_0 = 6 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3}$ (40% AgI), 3 — экспериментальные данные для состава с 2% AgI, 4 — с 40% AgI.

Согласно формуле (1), зависимости среднего размера образующихся частиц от параметров m и λ_0 предполагают сильную зависимость величины выхода η от этих параметров. Это видно из рис. 4, где представлены расчетные зависимости η от параметра m для разных температур переохлажденного облака при двух значениях λ_0 . Результаты экспериментальных измерений

при температуре $T_2 = -10^\circ\text{C}$ для составов с 2% AgI и 40% AgI. Отметим, что 2%-ный состав содержит в качестве иодирующей добавки NH_4I , а 40%-ный состав — KI.

Из рис. 4 видно, что изменение параметра m приводит к существенному изменению выхода активных частиц, причем при температурах облака выше -15°C для состава с 2% AgI и -7°C для состава с 40% AgI наблюдается немонотонная зависимость величины η от параметра m , т. е. вначале при увеличении m величина η возрастает до некоторого значения, дальнейшее увеличение m приводит к снижению выхода активных частиц. Аналогичная немонотонность зависимости η от m экспериментально отмечена при температуре $T_2 = -10^\circ\text{C}$ для состава с малым содержанием AgI.

Сравнение экспериментальных данных для двух составов показывает, что в исследованном диапазоне изменения параметра m ($m < 6$) выход активных частиц при $T_2 = -10^\circ\text{C}$ для состава с 2% AgI почти на порядок величины выше, чем для состава с 40% AgI. Однако согласно результатам расчетов, такое превышение величины выхода для состава с меньшим содержанием AgI должно наблюдаться только до определенного значения m . Как показывают расчеты (см. рис. 4), уже при $m \approx 6$ значения величины η для составов с 2% и 40% AgI совпадают ($T_2 = -10^\circ\text{C}$). Дальнейшее увеличение m приводит к тому, что выход активных частиц для состава с 40% AgI становится больше, чем для состава с 2% AgI.

Немонотонная зависимость η от m , полученная не только теоретически, но и экспериментально, объясняется совместным действием двух механизмов, направленных навстречу друг другу: с уменьшением размеров частиц их общее число, получаемое из 1 г реагента, растет, и то же время вероятность $\nu(r)$ образования ледяного кристалла частицей радиуса r в области малых размеров быстро уменьшается [3]. При некотором значении m имеет место оптимальное сочетание r и значения функции $\nu(r)$, что соответствует максимуму в зависимости η от параметра m .

Сравнение экспериментальных и расчетных данных, приведенных на рис. 3 и 4, показывает качественное согласование. Различие в абсолютных значениях η_2 и η для теории и эксперимента объясняется, во-первых, тем, что в реальном процессе в формировании льдообразующих частиц, кроме паров иодистого серебра, участвуют пары других веществ, и, во-вторых, отличием значений функции $\nu(r)$ для реальных частиц от значений $\nu(r)$, принятых в расчетах для частиц чистого иодистого серебра.

Не останавливаясь на обсуждении других полученных в настоящих исследованиях закономерностей, укажем, что выявленные зависимости величины выхода η активных частиц от отношения m скоростей и процентного содержания AgI в составе

(n_0) представляются очень важными для практики. Прежде всего это связано с тем, что уже сейчас на основании этих результатов можно рекомендовать внедрение состава с малым содержанием AgI для генераторов, у которых $m \leq 6$. Для генераторов с $m > 6$ (типа «Алазань», «Облако») такая рекомендация еще преждевременна, поскольку, как показывают расчеты (см. рис. 4), в этом диапазоне выход активных частиц начинает быстро падать с увеличением m .

С другой стороны, полученные результаты позволяют давать некоторые рекомендации по оптимизации процесса генерации с целью получения максимальной эффективности действия генератора. Так, например, проведенные нами оценки для существующего типа генератора («Алазань») с 2% AgI показывают, что можно повысить производительность генератора в 5 раз, если создать условия, при которых в любой момент времени величина $m \approx 3$. Это условие легко выполнить на практике путем изменения геометрической формы шашки.

Другим примером оптимизации может служить применение в генераторе, скажем, двух составов с разным содержанием AgI. В частности, на начальном промежутке времени, когда $m > 6$, возгоняется состав с 40% AgI, затем, когда m уменьшается до $m < 6$, возгоняется состав с 2% AgI. Расчет показывает, что при такой схеме применения составов в ракете «Алазань» общее число активных при температуре -10°C частиц увеличивается в 4 раза по сравнению с тем, если бы использовался только состав с 2% AgI.

Применение указанных выше модификаций существующих типов пиротехнических генераторов может принести значительный экономический эффект за счет сокращения расхода дефицитного иодистого серебра и уменьшения количества генераторов, необходимых для получения положительного эффекта воздействия.

Таким образом, проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили впервые выявить основные параметры, определяющие эффективность действия генераторов льдообразующих аэрозолей в реальных условиях воздействия. На основании результатов теоретических исследований впервые разработана методика корректных испытаний полноразмерных генераторов и указаны возможные пути оптимизации процесса генерации льдообразующих аэрозолей с целью получения максимальной эффективности действия генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 493 628 (СССР). Способ формирования представительных проб аэрозолей/С. П. Беллев, О. А. Волковичий, Ю. Д. Дьяченко и др. — Заявл. 26.03.74 № 201488/18—10; опубли. 12.12.75, (53) 551,609,616 (028,8). — В кн.: Бюлл. открытий, изобретений, промышленных образцов и товарных знаков, 1976, № 46, с. 118.

2. Беллев С. П., Ким Н. С. Измерение размеров искусственных льдообразующих ядер диффузионными батареями.— В кн.: Тезисы докладов VIII Всесоюз. совещ. по проблеме изыскания и исследования льдообразующих реагентов и их аэрозолей, Кишинев, 1977, с. 23—26.
3. Исследования зависимости льдообразующей активности аэрозолей подстигого серебра от дисперсности/Б. Э. Горбунов, Н. А. Какуютина, К. П. Куцелогин, В. И. Макаров.— Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана, 1976, т. 12, № 12, с. 1295—1302.
4. Исследования эффективности действия природных пиротехнических генераторов льдообразующих аэрозолей/С. П. Беллев, Ю. Д. Дьяченко, Н. С. Ким и др.— Труды ИЭМ, 1976, вып. 14(59), с. 21—32.
5. Мазлоцкий Д. А. Кинетика лавинной конденсации молекулярного аэрозоля окиси железа.— Коллоидный журнал, 1970, т. 32, вып. 2, с. 238—244.
6. Плауде Н. О. Исследования льдообразующих свойств аэрозолей подстигого серебра и подстигого свинца.— Труды ЦАО, 1967, вып. 80, с. 88.
7. Рузер Л. С. Радиоактивные аэрозоли.— М.: Изд. Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СМ СССР, 1968.— 192 с.
8. Сутугин А. Г. Образование аэрозолей при объемной конденсации быстрого типа. Автореф. дисс. на соискание ученой степени доктора хем. наук.— Москва, 1975.— 345 с.
9. Тушицкий Н. Н. О конденсации пересыщенных паров. ЖФХ, 1941, т. 15, вып. 10, с. 1061—1071.
10. Фукс Н. А. Механика аэрозолей.— М.: Изд-во АН СССР, 1955.— 381 с.
11. Rovinsky R., Snow I. Secondary particulate matter from teleovorgans.— J. Met., 1961, vol. 18, N 6, p. 736—747.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Вып. 27(100)

1981 г.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ ИНЖЕНЕРНОЙ МОДЕЛИ
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ
ВЕТРА НА ВЫСОТНОЙ МАЧТЕ

И. Л. БЫЗОВА, Э. Е. ВЯЛЬЦЕВА

В последние годы при создании моделей пограничного слоя атмосферы внимание привлекают случаи, когда высота этого слоя отличается от экмановской в связи с влиянием внешних факторов и нестационарностью [13, 18]. Кроме того, при апробации таких моделей по реальным результатам измерений возникают трудности определения входных параметров, в частности шероховатости над неоднородной поверхностью суши [15]. В настоящей работе в рамках инженерной модели [10, 11] проводится оценка отмеченных факторов и уточняются некоторые параметры модели. Результаты апробации показали, что в условиях средних широт при нейтральной стратификации над сушей влияние неоднородности подстилающей поверхности на профили метеоэлементов сказывается сильнее, чем нестационарность. Отличие же пограничного слоя от экмановского выделить не удалось.

Модель [10, 11] была выбрана потому, что, будучи достаточно общей в своей основе, она позволяет оценивать оба упомянутых фактора, а конкретная аппроксимация безразмерных дефектов скорости ветра позволяет связать результаты измерений с универсальными функциями пограничного слоя разными способами, в том числе без привлечения данных о верхней границе пограничного слоя, что особенно ценно в случае ограничения измерений по высоте. Сущность модели заключается в том, что для универсальных функций безразмерных дефектов скоростей в случае нестационарного пограничного слоя предлагаются интерполяционные формулы, которые приводят к выражениям

$$\begin{aligned} u(z) &= \frac{u_*}{\alpha} \ln \frac{z}{z_0} = u_* N \left(\frac{h}{h} \right) \varphi_u \left(\frac{z}{h} \right), \\ v(z) &= -u_* M \left(\frac{h}{h} \right) \varphi_v \left(\frac{z}{h} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь z — вертикальная координата; u и v — горизонтальные компоненты скорости ветра (приземный ветер направлен вдоль оси u); u_* — скорость трения; h — фактическая высота пограничного слоя.

$\lambda = \kappa u_* / f$ — экмановский масштаб пограничного слоя; f — ускорение Кориолиса; N, M, φ_u и φ_v — безразмерные универсальные функции.

Для M и N в [10] предлагаются интерполяционные выражения

$$M = \kappa m \frac{h}{\lambda}, \quad N = n_0 - \kappa n \frac{h}{\lambda}, \quad (2)$$

причем безразмерные константы n_0, n, m связаны с безразмерными константами законов сопротивления [3]:

$$A = -\frac{\kappa G \sin \alpha}{u_*}, \quad B = \ln \frac{u^*}{f z_0} - \frac{\kappa G \cos \alpha}{u_*}, \quad (3)$$

где G — скорость геострофического ветра, α — угол поворота ветра в пограничном слое.

В случае экмановского пограничного слоя $h = c_0 \lambda$, тогда

$$m = \frac{A}{\kappa^2 c_0}, \quad \kappa(n_0 - \kappa c_0 n) = -B - \ln \kappa c_0. \quad (4)$$

На основе закона сопротивления для пограничного слоя на пластине [6] предлагается оценка $n_0 = 2,6$, откуда, считая $B = 1,1$, $\kappa = 0,4$, $c_0 = 0,5$, $A = 4,3$, имеем $n = 6,6$, $m = 54$. Этот набор констант используется в [10, 11].

Из (1) и (2) следует

$$\frac{u(z)}{u_*} - \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} = (n_0 - \kappa n \frac{h}{\lambda}) \varphi_u(\xi), \quad (5)$$

$$\frac{v(z)}{u_*} = -\kappa m \frac{h}{\lambda} \varphi_v(\xi) = -\frac{G}{u_*} \varphi_v(\xi) \sin \alpha, \quad (6)$$

где $\xi = z/h$. Левые части этих выражений, а также $G, \sin \alpha, z_0$ можно определить по результатам измерений профилей ветра. Поперечная компонента $v(z)$ позволяет сразу определить

$$\varphi_v\left(\frac{z}{h}\right) = \frac{v(z)}{G \sin \alpha}. \quad (7)$$

Если принимается линейное приближение для $\varphi_v(\xi)$, то по (7) можно оценить h . В противном случае просто уточняется вид этой функции. Поскольку модуль скорости ветра $V(z) = (u^2 + v^2)^{1/2}$ измеряется с большей точностью, чем компоненты в отдельности, для сравнения с результатами измерений целесообразно ввести

$$V(z) - \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} = P(z). \quad (8)$$

При малых ξ , учитывая, что $\varphi_u(\xi)$ и $\varphi_v(\xi) \rightarrow 0$ при $\xi \rightarrow 0$, с учетом (2) имеем

$$P(z) = u_* \left[N \varphi_u(\xi) + \frac{1}{2} \frac{M^2 \varphi_v^2(\xi)}{\ln \frac{z}{z_0}} + \dots \right]. \quad (9)$$

В [10, 11] для φ_n и φ_n предлагаются два варианта интерполяционных формул

$$\varphi_0^{(1)} = \varphi_0^{(2)} = \xi \quad (10)$$

и

$$\varphi_n^{(2)} = a_2^{(2)} \xi^2 + a_4^{(2)} \xi^4, \quad \varphi_n^{(3)} = b_1^{(3)} \xi + b_3^{(3)} \xi^3. \quad (11)$$

При этом $a_2^{(2)}$, $a_4^{(2)}$, $b_1^{(3)}$ и $b_3^{(3)}$ связаны рядом соотношений, из которых легко получить

$$\begin{aligned} a_2^{(2)} &= 6 + 7,5 N_0^{-1}, & b_1^{(3)} &= 3 - 4 M_0^{-1}, \\ a_4^{(2)} &= -5 - 7,5 N_0^{-1}, & b_3^{(3)} &= -2 + 4 M_0^{-1}, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$M_0 = x^2 m \omega_0^2 = c_2 \lambda,$$

$$N_0 = x(n_0 - x n c_1) = -B - \ln x c_1.$$

Для φ_n полезны могут быть так же, как будет показано ниже, аппроксимационные формулы, содержащие первую степень

$$\varphi_n^{(3)} = a_1^{(3)} \xi + a_3^{(3)} \xi^3 \quad \text{или} \quad \varphi_n^{(4)} = a_1^{(4)} \xi + a_3^{(4)} \xi^3. \quad (13)$$

В этих случаях

$$a_1^{(3)} = 3 - 4 N_0^{-1}, \quad a_3^{(3)} = -2 - 4 M_0^{-1} \quad (14)$$

или

$$a_1^{(4)} = 4 + 6 N_0^{-1}, \quad a_3^{(4)} = -3 - 6 M_0^{-1}. \quad (15)$$

Обращаясь к выражению (9), получим оценку первого члена разложения $P(z)$ для случая, когда $\varphi_n(\xi)$ имеет вид (11)

$$P(z) = u_* \left(N a_2^{(2)} + \frac{M^2 a_1^{(2)}}{1 \pm \frac{z}{z_0}} \right) \xi^2 + \dots \quad (16)$$

и когда она имеет линейную часть

$$P(z) = u_* N a_1 \xi + \dots \quad (17)$$

В [14] для $P(z)$ при малых z предлагается линейная зависимость

$$P(z) = \beta f z + \dots \quad (18)$$

где $\beta = 144$ при $h = c_0 \lambda$.

Зависимость вида (18) следует из (17), причем для случая экмановского пограничного слоя связь между универсальной константой B и константой β имеет вид

$$\beta = c_1 - c_2 B, \quad (19)$$

где c_1 и c_2 составляют 110 и 37,5 для (14) и 155 и 50 для (15). Из (11) приходим к выражению

$$P(z) = \beta_1 \frac{z^2}{u_*} + \dots \quad (20)$$

где β_1 определяется аналогичной формулой при $c_1 = 213$, $c_2 = 75$.

Отметим еще, что поперечная компонента скорости ветра в случае экмановского пограничного слоя при малых x и $b_1 = 1$ выражается в виде

$$v(x) = m/x = \frac{A}{x^2 c_0} f(x), \quad (21)$$

Диапазон значений универсальных функций B и A при нейтральной стратификации приведен в табл. 1. Здесь следует отметить, что выбор нейтральных условий в [3, 7, 8, 9, 13, 17] проводился несколько по-разному. Известное разногласие в оценках A и особенно B связано как с этим обстоятельством, так и качеством использованного материала; согласно [7], оно также отражает тот факт, что A и B — не универсальные функции и зависят от z_0 и G . Для определения $F(x)$ и $v(x)$ использовались результаты измерений на высотной мачте ИЭМ. Близкая к нейтральной стратификации обеспечивалась отбором случаев при скорости ветра на уровне 300 м не менее 15 м/с и среднем градиенте температуры в слое 2—300 м в пределах от 0,6 до 1,2°C на 100 м. Чтобы избежать влияния резкой выраженной адвекции и оставшегося влияния стратификации, дополнительно на этой выборке были отбракованы случаи с левым поворотом ветра или с углом поворота более 30°, а также с аномально большими (более 4) значениями отношения скоростей ветра на уровнях 300 и 8 м.

Таблица 1

Универсальные функции A и B при нейтральной стратификации по определениям разных авторов

Источники, условия	A	B
Весь диапазон по литературным данным в [7]	1,3—13	—6—7,8
Данные О'Нэйла [3]	2—5	1—2
Данные Вангара [13, 17]	4,8±0,7	1,1±0,5
Данные Вангара, принятые в [10, 11]	4	1
Трава, $z_0 \approx 2$ см, G от 5 до 20 м/с [7]	7,6—6,0	0,2—3,4
Свет, $z_0 = 0,07$ см, G от 5 до 20 м/с [7]	11,1—9,4	0,2—4,2
Вода на поверхности [7]	3,4—6,6	2,8—2,6
Данные с высотной мачты ИЭМ [8, 9]	5—7	—4—7
То же, оптимальный вариант [9]	5	—4

За 1968—1978 гг. (период автоматизированных измерений) было отобрано 20 таких случаев. Господствующим направлением ветра для них было южное и юго-западное. Подстилающая поверхность в этих направлениях от мачты за рассматриваемый период почти не изменилась. Это открытая поверхность типа луга до расстояний в 200—300 м, далее лесной массив протяженностью до 0,5 км (не по всему сектору) и городская застройка протяженностью 1,5—3 км.

В большинстве случаев условия отбора соблюдались в течение нескольких часов. Многочасовые измерения оказались по основным характеристикам однородными, влияние нестационарности явно не

просматривалось, поэтому в одних случаях они были усреднены за весь период измерений, в других был выбран один представительный профиль. Характеристика отобранных случаев приведена в табл. 2. Здесь n_1 — число случаев, n_2 — число часов, V_{300} и V_{Φ} — скорости ветра на уровне 300 и 8 м, α' — угол поворота ветра в слое от 8 до 265 м, S — интегральный параметр устойчивости по [3]. Его значения ($|S| < 20$) свидетельствуют о том, что пограничный слой можно считать практически нейтральным. Хотя в некоторых случаях на синоптических картах на некотором расстоянии от пункта наблюдений отмечались фронтальные зоны, их непосредственное влияние на отобранные профили не сказывалось, так как случаи с явным и резким изменением направления ветра были отбракованы.

Таблица 2

Характеристика использованных результатов измерений на высотной мачте

Параметр	Утро	День	Вечер	Ночь
Зима (декабрь—февраль)				
n_1 (n_2)	3 (7)	1 (3)	1 (2)	5 (13)
V_{300}/V_{Φ}	3,5	2,8	3,6	3,3
α'	18	17	25	23
S	10—13	11	11	-12—20
Осень (сентябрь—ноябрь)				
n_1 (n_2)	2 (4)	4 (8)	1 (3)	3 (7)
V_{300}/V_{Φ}	3,6	3,2	3,6	3,4
α'	18	21	23	14
S	15—17	-4—11	17	0—16

Для оценки $\varphi_n(\xi)$ необходимо знать G и α . G бралось равным 1,1 V_{300} согласно [12]. Поскольку угол α принимался равным углу α' , он мог быть несколько зависящим.

Кроме перечисленных данных использованы обобщенные ветровые коэффициенты по [5] и данные о профилях ветра при безразличной стратификации из [7, 16].

Результаты анализа поперечной компоненты представлены на рис. 1. Из данных [16] использован только один профиль, соответствующий $G=18,5$ м/с и почти нейтральной стратификации (кривые 3), остальные случаи в [16] при нейтральной стратификации соответствуют $G \leq 8$ м/с и дают большой разброс, связанный с влиянием бароклинности и с неизвестными причинами. Из данных [7] использованы профили при нейтральной стратификации и разных значениях G (~ 10 м/с — кривая 2 и ~ 20 м/с — кривая 2'), причем зимние и летние данные объединены. На рис. 1 объединены все че-

40

тыре профиля (кривая 5) и добавлены данные еще одного стандартного профиля при нейтральной стратификации из [7] (кривая 5'). Результаты, полученные на высотной мачте, показаны на рис. 1 кривыми 1, приведен также среднеквадратичный разброс $v(z)$ на некоторых уровнях.

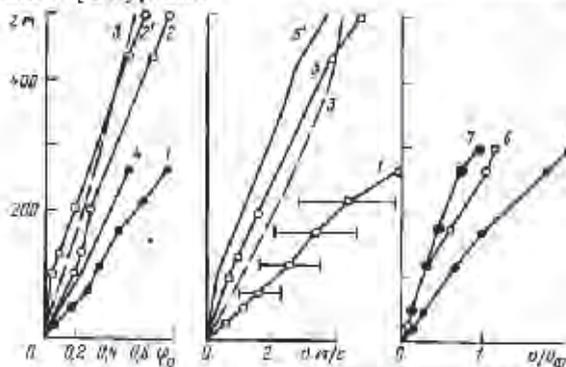


Рис. 1. Данные о поперечной компоненте скорости ветра.

Из рис. 1 видно, что, согласно всем данным, для $v(z)$ при $z < 300$ м вполне удовлетворительно линейное приближение. Данные [7] и единственного профиля [16] ложатся достаточно близко, данные же, полученные на высотной мачте, приводят по сравнению с ними к завышенным значениям как $v(z)$, так и φ_0 .

Причины такого завышения в результатах на рис. 1 различны. Значения φ_0 завышены, очевидно, в первую очередь по причине занижения угла поворота в пограничном слое. Средний угол поворота в 300-метровом слое по использованным данным составляет 20° . Если считать, что во всем пограничном слое он близок к 30° [2], то легко ввести поправку и получить вместо кривой 1 кривую 4, значительно сблизив ее с кривыми 2 и 3. На величину же $v(z)$ эта погрешность в определении α влиять не может, поскольку угол поворота отсчитывается от $z=0$. Здесь более вероятной причиной расхождения следует считать влияние окружающей местности: основной массив использованных данных соответствует юго-западному и южному направлениям, по которым набегающий поток пересекает городские застройки и лес. В использованном массиве данных слишком мало случаев для обоснованного выявления этого влияния, поэтому были использованы результаты обобщений в [5], где получены ветровые коэффициенты и средние углы поворота ветра при почти нейтральной стратификации в зависимости от направления ветра. Посчитанные по этим данным значения $v(z)/v_0$ представлены на рис. 1 (6 — все данные вместе, 7 — поток с поля, 8 — с леса и застройки). Из этого рисунка отчетливо видно влияние городских застроек и леса. При $v_0 = 3$ м/с (среднее по массиву, использованному в [5]), значения $v(z)$ для города близки к кривой 1, а для поля — к кривой 5.

Если, воспользовавшись (4), оценить по полученным профилям универсальную функцию A при нейтральной стратификации, то она при $x^2 z_0 = 0,08$ получится равной около 5,1 по данным кривой 5, 6,3 — по данным кривой 3 и 12,7 — по данным кривой 1. Эта константа получается несколько завышенной по сравнению с [7—9].

Для расчета функции $P(z)$ необходимо знать z_0 и u_* . Поскольку подстилающая поверхность вокруг высотной мачты искажена строениями и растительностью и определенная по профилю ветра в слое до 8 м микрошероховатость не всегда совпадает с мезошероховатостью [1, 4], z_0 и u_* определялись тремя способами. Первый состоял в том, что шероховатость податалась равной средней микрошероховатости $z_0^{(1)}$, типичной для данного времени года — 1—2 см осенью, а зимой при плотном снежном покрове 0,07 см.

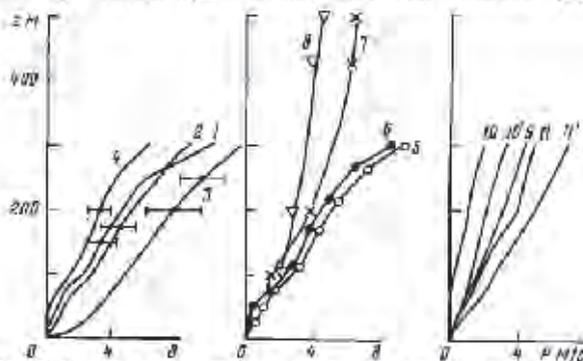


Рис. 2. Значения $P(z)$ по разным материалам измерений в разных временах z_0 .

Второй способ — определение шероховатости по спланированному профилю ветра в слое до 10 м, считая его логарифмическим — \tilde{z}_0 . Та же процедура по профилю ветра от 8 до 50 м дает величину \tilde{z}_0 . В результате оказалось, что в пяти случаях $z_0^{(1)} = \tilde{z}_0 = \bar{z}_0$, в четырех случаях $z_0^{(1)} \neq \tilde{z}_0 \neq \bar{z}_0$ и в остальных $z_0^{(1)} \neq \tilde{z}_0 = \bar{z}_0$. При этом значения \tilde{z}_0 были, как правило, от 1 до 8 см и только в четырех случаях от 20 до 40 см, а значения \bar{z}_0 — от 30 до 40 см.

Влияние выбора значений z_0 на определение $P(z)$ показано на рис. 2. Здесь даны осредненные профили $P(z)$ для первых пяти случаев (кривая 1), всех случаев, кроме этих пяти, при \tilde{z}_0 или $\tilde{z}_0 < 10$ см (кривая 2), то же при $\tilde{z}_0 = z_0^{(1)}$ (кривая 3) в то же при $\tilde{z}_0 = \bar{z}_0$, $\tilde{z}_0 > 10$ см (кривая 4). В качестве наиболее обоснованной дана кривая 5, полученная как средняя кривых 1 и 2. Кривая 6 по-

дучена путем предварительного обрешения всех 20 профилей скорости ветра, причем шероховатость, определенная по усредненному профилю, оказалась равной 6,2 см. Этот способ привел к результатам, почти совпадающим с кривой 1. Значения $\bar{P}(z)$ по профилям ветра из [7] представлены кривыми 7 ($G=10$ м/с) и 8 ($G=20$ м/с). Рис. 2 подтверждает особенность профилей скорости ветра по материалам табл. 2, обнаруженную на рис. 1: отклонение их от профилей [7] в сторону завышения, связанное, по-видимому, с той же причиной — наличием подстилающей поверхности. Объективность этой особенности подтверждается тем, что разные способы усреднения приводят к весьма близким результатам. Для оценки этого влияния на рис. 2 приведены результаты аналогичных расчетов по профилям скорости ветра, восстановленным по ветровым коэффициентам [5] при $V_d = 3$ м/с. Здесь кривая 9 соответствует всем направлениям

($z_0 = 10$ см), кривые 10' и 10 — набегающему потоку с поля ($z_0 = 0,07$ см и 10 см соответственно), кривые 11 и 11' — набегающему потоку от города и леса ($z_0 = 40$ см и 10 см). Так же, как и на рис. 1, кривая 10' (при наиболее обоснованной шероховатости, поскольку в [5] использованы преимущественно данные дальние) очень близка к данным [7], а кривые 11 и 11' — наиболее от них удалены в сторону завышения.

Полученный общий вид функции $P(z)$ позволяет предположить, что в отличие от гипотезы (11) в нижней части слоя она имеет близкий к линейному рост с ростом z . Если это так, то нетрудно установить, исходя из данных измерений, оптимальные значения B , которые приведены в табл. 3. Эти оценки получены при условии гипотезы (13) относительно $\Phi_n(z)$ и в этом их ограниченность. Однако следует отметить, что в отличие от оценок, приведенных в табл. 1, здесь не привлекались данные о геострофическом ветре, которые вносят дополнительную погрешность. Значения B получаясь при этом несколько большими, чем при прямом их определении по тем же данным измерений в [7, 8] (табл. 1).

Совершенно ясно, что попытки определения высоты пограничного слоя по (6) и (10) для каждого отдельного случая и выделения на основе соотношения между ней и λ нестационарных случаев, обречены на неудачу, так как в определении λ и λ слишком много погрешностей и произвола. В частности, λ очень сильно зависит от принятого значения z_0 . Не внесли ясности также отобранные случаи с приподнятой инверсией, нижнюю границу которой можно было бы считать верхней границей пограничного слоя. Они не допу-

Таблица 3

Кривая на рис. 2	Значения β и B при разных выборах	B	
		по (14)	по (15)
10'	56	1,5	2
8	100	0,27	1,1
9	120	-0,32	0,66
11	130	-0,61	0,44
11а [14]	144	-0,9	0,22
6	150	-1,0	0,14
11'	180	-1,95	-0,56
5, 6	220	-3,0	-1,3

скают простой трактовки в силу усложненных профилей температуры и скорости ветра и требуют особого анализа.

В целом проведенный анализ позволил сделать вывод о том, что в рамках использованной модели при нейтральных условиях выделить нестационарные условия или верхнюю границу пограничного слоя не экмановского происхождения не удастся, главным образом из-за влияния неоднородной подстилающей поверхности. Это влияние проявляется достаточно четко, и для его описания требуется инженерная модель, учитывающая отмеченное обстоятельство.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бизюва И. Л. О шероховатости по измерениям на высотной мачте ИЭМ. — Труды ИЭМ, 1979, вып. 23(88), с. 27—34.
2. Зверев Л. С. Сипоптическая метеорология. — Л.: Гидрометеоиздат, 1958. — 774 с.
3. Зильдтикевич С. С. Динамика пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1970. — 292 с.
4. Мянгилова Г. Б. Параметр шероховатости по измерениям ветра в пределах 100 м. — Труды ИЭМ, 1972, вып. 26, с. 88—95.
5. Мянгилова Г. Б., Хазатурова Л. М. Эмпирическая модель профиля ветра и ее использование для оценки адвекции температуры. — Труды ИЭМ, 1977, вып. 16(69), с. 81—89.
6. Мониш А. С., Яглом Л. М. Статистическая гидромеханика. Ч. I. — М.: Наука, 1965. — 640 с.
7. Орленко Л. Р. Строение планетарного пограничного слоя атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1979. — 270 с.
8. Соловьев Г. И. Определение некоторых универсальных зависимостей в пограничном слое атмосферы. — Метеорология и гидрология, 1973, № 12, с. 54—58.
9. Соловьев Г. И. Об определении безразмерных характеристик пограничного слоя атмосферы по результатам измерений в 300-метровом слое. — Труды ИЭМ, 1974, вып. 6(44), с. 20—37.
10. Хакимов И. Р. Инженерная модель нестационарного пограничного слоя атмосферы при сильном ветре. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1976, т. 12, № 9, с. 982—985.
11. Хакимов И. Р. О профиле ветра в толщине нейтрального стратифицированного пограничного слоя атмосферы. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1976, т. 12, № 10, с. 1020—1023.
12. Шкляревич О. Е. Об оценке скорости геострофического ветра по данным наблюдений на уровне $z=300$ м. — Труды ИЭМ, 1977, вып. 16(69), с. 97—102.
13. Clark R. H., Hess J. D. Geostrophic departure and the function A and B of Rossby-number similarity theory. — Boundary-Layer Meteorology, 1974, vol. 7, p. 267—287.
14. Frieder F., Panofsky H. A. The geostrophic drag coefficient and the effective roughness length. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1972, vol. 38, N 415, p. 213—220.
15. Jensen M. O. Change of surface roughness and the planetary boundary layer. — Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1978, vol. 104, N 440, p. 351—358.
16. Laykauf H. Experimentelle Bestimmung Univerällter Profile and deren Abhängigkeit von Parametern. — Der Atmospherischen Grenzschicht, VDI Darmstadt, D/7, 1974. — 222 p.
17. Melgarejo I. W., Deardorff I. W. Stability function for the boundary-layer resistance laws based upon observed boundary-layer heights. — J. Atm. Sci., 1974, vol. 31, N 5, p. 1324—1333.
18. Yamada T. On the similarity functions A, B and C of the planetary boundary layer. — J. Atm. Sci., 1976, vol. 33, N 5, p. 781—793.

ОБ ОДНОМ МЕХАНИЗМЕ УСИЛЕНИЯ
КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В НЕОДНОРОДНО
ЗАПЫЛЕННОЙ АТМОСФЕРЕ

В.Н.ИВАНОВ, Л.У.ИИТЭЛЬ

В настоящей заметке рассматриваются ситуации, когда в пограничном слое атмосферы имеется примесь, поглощающая коротковолновое солнечное излучение. Сюда относятся, например, ситуации с запыленной нижней атмосферой над пустыней. Другой пример — мелкодисперсный углерод, введением которого в воздух можно, согласно /3/, заметно изменить радиационный баланс последнего с целью воздействия на некоторые атмосферные процессы. Настоящая заметка ограничивается рассмотрением ситуаций, в которых концентрация рассматриваемой примеси убывает с высотой. Базовое горизонтальное ее распределение предлагается для простоты однородным.

Пусть в рассматриваемом слое возникла циркуляционная ячейка с горизонтальной осью. При неустойчивой стратификации это может быть конвективная ячейка (в смысле конвекции газа Рэлея-Бенара). Ее многообразие структуры может, как известно, возникнуть и при слабостойчивой стратификации за счет числа динамических факторов (неустойчивость Феллера-Кейллора). В области восходящих движений в рассматриваемой ячейке концентрация примеси будет повышенной, но крайней мере в течение какого-то времени, поскольку восходящие движения поднимают вверх более запыленный воздух. В области нисходящих движений первое имеет противоположный знак; концентрация примеси при этом

будет убывать. Это означает дополнительный нагрев первой области по сравнению со второй, т.е. дополнительный положительную обратную связь, которая должна способствовать усилению рассматриваемой циркуляции на ее начальной стадии (до тех пор, пока прямая не будет пересечена и в область нисходящих движений).

Оценим некоторые количественные оценки этого эффекта. Пусть воздух в области восходящих движений за счет возмущенного горизонтально-неоднородного распределения примеси получает дополнительную тепловую энергию E ($\text{Дж}/\text{м}^2$). Это означает дополнительный нагрев $\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{E}{c_p \rho h}$ (град/с), где c_p и ρ — теплоемкость и средняя плотность воздуха соответственно; h — характерная высота, на которой распределяется дополнительный нагрев. Если возмущаются приближенные гидростатика (оно дает правильные порядки величин, когда горизонтальные размеры циркуляции не уступают по порядку величин вертикальным), то связанное с горизонтально-неоднородным нагревом возмущение давления составит $\frac{\partial p}{\partial x} = \alpha \rho g h \frac{\partial T}{\partial x}$. Здесь α — коэффициент термического расширения, g — ускорение свободного падения. За время Δt давление за счет дополнительного нагрева изменится на величину $p' = \frac{\alpha g E}{c_p} \Delta t$; $\frac{\partial p'}{\partial x} = \frac{\alpha g E \Delta t}{c_p \rho h}$, где x — горизонтальная координата, L — горизонтальный масштаб области восходящих движений. Оценим, к каким горизонтальным ускорениям может привести такой градиент давления. Для этого приравняем последние выражения локальной производной горизонтальной составляющей скорости по времени $\frac{\partial u}{\partial t}$ (рассматриваются достаточно малые интервалы времени, когда нелинейные и диссипативные слагаемые еще не существенны). Заменив производные конечными разностями, нетрудно получить

$$u' = \frac{\alpha g E (\Delta t)^2}{c_p \rho h}. \quad (I)$$

Если горизонтальные и вертикальные размеры рассматриваемой ячейки одного порядка, то, как вытекает из уравнения неразрывности, порядок u' совпадает с (I). Интересно отметить, что полученное выражение не зависит от вертикальных масштабов области дополнительного нагрева (но от h зависит его пределы применимости).

Для численной оценки воспользуемся значениями параметров, полученных в /3/ для тропического слоя атмосферы в тропической зоне (эти же значения используются для описания в в наших последующих статьях настоящего сборника). Расчеты радиационных процессов, выполненные в /3/, показали, что наличие в тропическом слое межполюснорных (размерами порядка десятых долей микрометра) части углерода в кол-

чества 30 кг/км^2 способны приводить к заметному поглощению коротковолнового солнечного излучения и к нагреву воздуха. Конкретно при этом поглощается (и идет в основном на нагрев воздуха) около 10% падающего коротковолнового солнечного излучения, что составляет порядка 100 Вт/м^2 . Пограничный слой при этом остается оптически тонким: потери энергии на длинноволновое излучение пренебрежимо малы, как и радиационное охлаждение частиц указанных размеров, в течение дня. Примем $E = 10^6 \text{ Вт/м}^2$, $\alpha = 3 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$, $C_p = 10^3 \text{ Дж/(кг·град)}$, $\Delta z = 10 \text{ мкм}$, $L = 10^3 \text{ м}$. Тогда из (1) получаем $u \sim 1 \text{ м/с}$, что сравнимо с характерными скоростями вертикальных движений в конвективных ячейках.

Таким образом, рассматриваемая положительная обратная связь может в благоприятных ситуациях быть достаточно интенсивной.

На достаточно больших интервалах времени, когда осуществляют роль может играть влияние возмущений скорости на адвективный перенос примеси, необходимо рассмотрение самосогласованной задачи, учитывающей это обратное влияние.

Отметим, что в недавних работах [1, 2] рассматривается среди прочего задача о возможности неустойчивости, связанной с аналогичным механизмом положительной обратной связи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Qian S.J. Unstable radiative-dynamical interaction. P.I. Basic theory. — *J. Atmos. Sci.*, 1989, vol. 46, N 16, p. 2528–2547.
2. Qian S.J. Unstable radiative-dynamical interactions. P.II. Expanded theory. — *J. Atmos. Sci.*, 1989, vol. 46, N 16, p. 2544–2561.
3. Weather modification by carbon dust absorption of solar energy / W.M. Gray, W.M. Frank, M.L. Corrin, G.A. Stokes. — *J. Appl. Meteorol.*, 1976, vol. 15, N 4, p. 365–386.

ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ВЫСОТНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ МАЧТЫ ИЭМ»

И. Ф. МАЗУРИН

Высотная метеорологическая мачта (ВММ) Института экспериментальной метеорологии, оснащенная датчиками и измерительной аппаратурой, является уникальным специализированным средством, позволяющим проводить исследования ветрового, термического и турбулентного режима нижнего 300-метрового слоя атмосферы для решения различных задач научного и прикладного характера. За время существования ВММ с ее помощью проведены многочисленные эксперименты, получены важные результаты. Однако возможности этого сооружения далеко не исчерпаны.

С целью дальнейшего совершенствования и повышения эффективности научных исследований, осуществляемых на базе измерительного комплекса ВММ, в последние 10 лет выполнен целый ряд работ, связанных с модернизацией датчиков, систем цифровой и аналоговой регистрации, решением вопросов метрологи-

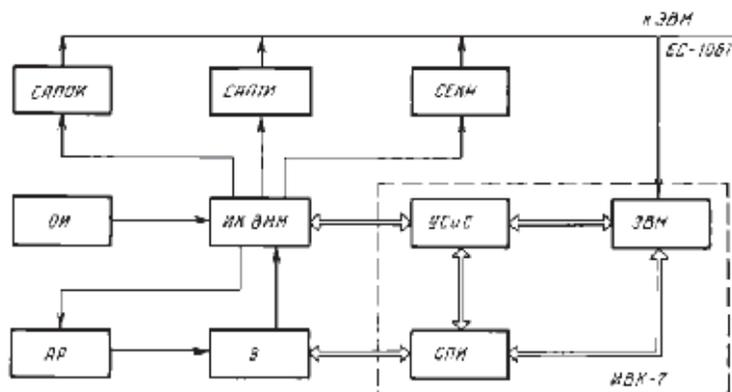
»

ческого обеспечении. Существенно изменился по своему качественному составу комплекс аппаратуры для измерений турбулентности: разработаны новые датчики пульсаций температуры, бифлюиды для измерения вертикального угла вектора ветра заменены акустическими анемометрами. В то же время система сбора и обработки информации [1, 2], в основу которой положен метод предварительной записи данных на дерфолекту, перестала отвечать требованиям эксперимента. Эта система не могла обеспечить измерение большого числа параметров в широком спектре частот. Возникла диспропорция между возможностями измерительной аппаратуры, с одной стороны, и системой регистрации и обработки исходных данных, с другой. В результате разделения во времени эксперимента и обработки данных организовать оперативную обратную связь, а следовательно и оперативный контроль качества эксперимента, не представлялось возможным. Отсутствие ЭВМ в системе сбора данных на ВММ сказывалось на совершенствовании измерительной системы, в частности нельзя было использовать нестандартные датчики, требовавшие индивидуальной градуировки, линейризации выходного сигнала и т. п. Таким образом, возникла настоятельная необходимость внедрения средств вычислительной техники на всех этапах получения и обработки информации, а именно включения ЭВМ непосредственно в комплекс измерительной и регистрирующей аппаратуры ВММ.

Для решения этой задачи в 1980 г. был разработан проект измерительно-вычислительного комплекса (ИВК) ВММ, а в 1982—1985 гг. осуществлена его техническая реализация. При создании ИВК ВММ в значительной степени подверглась модернизации аппаратура для измерения температуры воздуха и направления ветра, в меньшей степени — регистраторы скорости ветра и влажности воздуха. Создание ИВК ВММ позволило до конца автоматизировать не только процесс сбора и регистрации данных, но и процесс обработки. С включением ЭВМ в комплекс аппаратуры ВММ замкнулся весь цикл экспериментальных исследований от проведения самого эксперимента до получения результатов в виде, пригодном для научного анализа.

Наиболее полное описание аппаратуры ВММ было представлено В. Н. Ивановым в 1970 г. [1]. В последние 10—15 лет этому вопросу посвящено лишь несколько работ частного характера. Целью настоящей статьи, как и большинства других статей сборника, является подведение итога определенного этапа работ по созданию измерительно-вычислительного комплекса ВММ. Для наиболее полного представления о принципах построения и характере работы комплекса как единого целого в статье в краткой форме дается общее описание схемы ИВК ВММ, его структуры, режимов работы. Более детальное описание отдельных подсистем, устройств и приборов, входящих в состав ИВК ВММ, дано в последующих статьях сборника, причем акцент сделан на тех вопросах, которые ранее в литературе не освещались.

Создание ИВК ВММ облегчалось рядом обстоятельств. Во-первых, к этому времени был модернизирован измерительный комплекс ВММ и переведена на современную материально-техническую базу система автоматической перфорации, переоборудована система аналоговой регистрации. Во-вторых, в стране был освоены выпуск промышленных средств информационно-измерительной и вычислительной техники, в частности измерительно-вычислительных комплексов на базе малых машин СМ, что дало возможность создавать новые проблемно-ориентированные комплексы, совместимые программно, аппаратно, методически. В-третьих, был разработан и отлажен комплекс рабочих программ статистической обработки данных измерений на ЭВМ ЕС-1058. И в-четвертых, накоплен большой опыт по автоматизации сбора и обработки данных, составлению программ обработки, освоению операционных систем ЭВМ.



Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса высотной метеорологической вышки

Перейдем теперь к описанию структурной схемы ИВК ВММ, представленной на рисунке. Под измерительно-вычислительным комплексом обычно понимают совокупность программно-управляемых технических средств, предназначенных для получения, преобразования, накопления, обработки и представления информации. Следовательно, уровень организации структуры любого ИВК определяется уровнем автоматизации процесса сбора и обработки информации. С этой точки зрения рассмотрим организацию структуры ИВК ВММ, которая приведена на схеме в укрупненном виде. Датчики измерительного комплекса (ИК) Высотной метеорологической вышки, воспринимающие информацию об изменениях метеорологических параметров в нижнем 300-метровом слое как объекте исследования (ОИ), с помощью устройства сопряжения и согласования связаны непосредственно с ЭВМ. Это позво-

ляет проводить экспериментальные исследования с передачей данных измерений в память ЭВМ в режиме прямого ввода, который является основным режимом работы ИВК ВММ.

Измерительный комплекс включает в себя датчики для определения средних значений метеорологических величин, а также малонерционные датчики для измерения их пульсаций и специальные датчики. К первой группе относятся стандартные датчики параметров ветра (скорости и направления) типа 16А-1, влажности воздуха 9А-1 и датчики для измерения температуры и разностей температуры воздуха, разработанные и изготовленные в ИЭМе. Подробно об этой группе датчиков и системах измерения указанных параметров можно смотреть в трех последующих статьях настоящего сборника. Ко второй группе относятся датчики пульсаций температуры, вертикальной и горизонтальной составляющих скорости ветра, датчики актинометрических измерений и др. Общие сведения об измеряемых параметрах и уровнях измерения представлены в таблице.

Расположение датчиков на уровнях МММ и ВММ

Измеряемый параметр	Высота, м				Блоки ВММ														
	0,5	1	2	4	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Температура	+				+	+													+
Градиент температуры	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
Влажность						+	+			+									+
Скорость ветра		+	+	+		+	+	+	+				+		+				+
Направление						+	+	+											+
АКАН*		+																	+
Пульсации температуры						+		+		+					+				+
Актинометрические измерения						+		+					-		+				+

* Расположение акустических анемометров и датчиков пульсаций температуры меняется в зависимости от задачи исследования.

Основные эксплуатационные требования к датчикам, используемым на ВММ, связаны с суровыми условиями их работы, отличающимися от приземных условий: большими скоростями ветра, возможностью гололедных и изморозевых отложений в холодное время года, наличием низкой облачности, сложностью оперативного доступа и непрерывного контроля состояния датчиков, установленных на ряях, необходимостью постоянного ориентирования по направлению основного потока (например, акустических анемометров), массовым количеством датчиков. В очень тяжелых условиях находятся датчики, когда они попадают в «тень» мачты, т. е. на подветренную сторону. В этом случае они подвержены

сильному порывистому воздействию ветра, который резко изменяется как по направлению, так и по скорости.

Из приведенной таблицы видно, что измерения метеопараметров осуществляются не только на уровнях ВММ, но и в приземном слое на малой метеорологической мачте (МММ), которая расположена на площадке на расстоянии около 200 м от ВММ. Для лучшей связи измерений на малой и большой мачтах вблизи метеоплощадки имеется 25-метровая мачта, на верхнем уровне которой дублируются все измерения первого бадкона ВММ.

Комплексы средств регистрации и вычислительной техники размещаются в здании, находящемся вблизи основания ВММ. Все датчики ИК, имеющие выходной сигнал в виде напряжения постоянного тока, с помощью устройства сопряжения и согласования (УСиС) связаны непосредственно с ЭВМ. В состав УСиС входят три электронных коммутатора, согласующие помехозащитные фильтры, быстродействующий аналого-цифровой преобразователь. Это устройство является принадлежностью ИВК-7, а к нему добавлены согласующие фильтры нижних частот с переменной частотой среза f_c . Фильтры, с одной стороны, обеспечивают защиту от возможных помех в измерительных линиях связи, длина которых составляет более 300 м, а с другой — дают возможность согласовать частоту среза каждого канала с временем квантования Δt . Согласно теореме Котельникова эти величины связаны соотношением $\Delta t \leq \frac{1}{2f_c}$. Правильнее сказать, что частота среза задается исходя из требований эксперимента, а затем уже выбирается Δt . С помощью переключателя частоту среза фильтров можно менять дискретно от 0,1 до 10 Гц при каждом переключении на одну октаву.

Как видно из структурной схемы, к ИВК-7 кроме устройства сопряжения и согласования относятся ЭВМ и средства представления информации. В состав последних входят широкая печать, дисплей и графопостроитель. Потенциальные возможности ИВК ВММ определяются входящей в его состав ЭВМ СМ-4, на которую возлагаются следующие основные функции:

программный опрос датчиков ИК и регистрация исходных данных на магнитный диск, быстрый доступ к этой информации;

первичная обработка результатов измерения (линеаризация, масштабирование, перевод в реальные физические единицы, внесение поправок, например, при градуировке датчиков и т. д.), контроль информации с целью выявления отклонения от заданных уровней и диапазонов измерений, обнаружения ошибок и уменьшения погрешностей, решение задач фильтрации;

вычисление статистических характеристик измеряемых параметров, характеристик состояния пограничного слоя атмосферы, профилей метеоземлептов и др.;

сервисная обработка измерительной и расчетной информации (представление результатов в виде таблиц, графиков);

временное хранение на машинном носителе массивов информации.

чик объемом до 10^7 Кбайт с возможностью обращения к ним по требованию;

хранение программ обработки и обеспечение их корректировки;

оперативная обработка информации в процессе эксперимента по заданным программам;

обеспечение возможности обработки данных, предварительно занесенных на перфоленду;

управление функционированием отдельных блоков комплекса в ходе эксперимента (выполнение программ), обеспечение диалогового режима с оператором;

контроль работоспособности блоков и измерительных трактов (автоматическая самопроверка, в том числе по метрологическим характеристикам).

Функции в роль ЭВМ СМ-4 не исчерпываются перечисленными выше. В частности, включение ЭВМ в структуру измерительного комплекса ВММ позволило в ряде случаев существенно упростить схему измерения и преобразования в техническом плане. Так, в системе измерения температуры воздуха устранены все дополнительные промежуточные элементы преобразования сигнала к виду, удобному для автоматизации измерений. Непосредственная связь всех датчиков с ЭВМ исключает необходимость использования промежуточной системы регистрации на машинный носитель в виде перфоленды или магнитной ленты. Все это соответственно увеличивает надежность и повышает точность результатов измерений.

Система аналоговой регистрации (АР) сохранена в составе ИМК ВММ в максимально возможном объеме. Она очень удобна и необходима для визуализации изменчивости исследуемых процессов во времени и по высоте, что важно при обработке измерений, интерпретации и анализе результатов эксперимента. АР дает возможность правильно определять время осреднения, выбрать интервалы стационарности, разумно задать длину фильтра выборок частот (например, для убирания тренда). В процессе эксперимента по данным АР можно оценить качество работы измерительных приборов и самого эксперимента. Большую роль играет АР в метрологическом обеспечении измерений (обнаружение неисправностей, калибровка, градуировка, поверка, подготовка эксперимента, сверка с данными цифровых измерений). В общей сложности система АР включает более 30 самопишущих приборов (4 многоточечных потенциометра типа ЭПИ-09 для регистрации осредненных параметров, остальные — одноканальные самописцы типа КСП-4 и многоканальные И327/5). Практически все измеряемые параметры могут быть записаны в аналоговом виде.

Кроме средств АР в распоряжении экспериментатора (Э) имеются другие средства представления информации (СПИ): графопроектор, алфавитно-цифровое печатающее устройство (АЦПУ), дисплей.

Как следует из рисунки, в состав ИВК ВММ кроме рассмотренных выше технических средств, определяющих основной режим работы, входят три других самостоятельных системы: две системы автоматической перфорации — осредненных и турбулентных измерений (*САПОИ* и *САПТВ*) и система ежеминутных климатических наблюдений (*СЕКН*). Система *САПОИ* обеспечивает считывание показаний датчиков скорости и направления ветра, температуры воздуха и ее вертикальных разностей (градиентов), влажности воздуха со всех рабочих уровней с дискретностью 72 с, причем инверсия датчиков согласуется с указанным промежутком дискретизации с помощью согласующих фильтров. Последующие расчеты на ЭВМ предполагают вычисление профилей метеорологических параметров с осреднением за 10 мин и за 1 ч, вычисление характеристик пограничного слоя.

Вторая система (*САПТВ*) использовалась для измерения турбулентности. Она может обеспечить одновременную регистрацию показаний ряда датчиков (до 15) с дискретностью 0,5 с. Обе эти системы могут работать как самостоятельно, так и параллельно с ЭВМ. Их связь с ЭВМ осуществляется на уровне перфоленки, которая может быть обработана либо в вычислительном центре ИЭМа, либо на месте на ЭВМ СМ-4.

Системы *САПОИ* и *САПТВ* [1, 2] сохранены в составе ИВК ВММ лишь на переходном этапе, до полного технического и методического освоения основного режима измерений с прямым доступом в ЭВМ. Что касается *СЕКН*, аппаратура и методики наблюдений которой подробно описаны в статье Л. М. Хачатуровой (см. настоящий сборник), то она останется в будущем в составе ИВК ВММ, но с более высоким уровнем автоматизации, чем в настоящее время.

В соответствии с различными типами задач ИВК ВММ работает в различных режимах. Однако, как показывает практика прошлых лет, основным методом получения информации о структуре исследуемого явля и является проведение специализированных тематических серий измерений. Тематический режим предусматривает включение всего комплекса или его части для непрерывной регистрации метеорологических параметров по индивидуальным программам-заявкам в зависимости от поставленной задачи. При этом обычно привлекаются дополнительные экспериментальные средства исследования (например, турбулентный комплекс, средства актинометрических, оптических и других специальных измерений). Для правильной интерпретации этих измерений необходимо иметь сведения о «метеорологическом фоне», которые получают с помощью регистрации осредненных значений метеопараметров. Пока, на переходном этапе, эти измерения осуществляются с помощью системы *САПОИ*. Время работы системы в тематическом режиме и, следовательно, объем информации определяется продолжительностью существования того или иного атмосферного явления, которое подлежит исследованию, и необходимостью накопления статистически обеспеченной информации. Чаще всего,

как показал опыт, длительность серий измерений в этом режиме составляет от 30 мин до нескольких часов, в отдельных случаях — до суток. В тематическом режиме при работе всей измерительной аппаратуры как средних, так и пульсационных характеристик поток информации максимален. Например, при работе только турбулентного комплекса (опрашиваются 15 каналов измерителей пульсаций температуры и составляющих скорости ветра с частотой 5 Гц) в течение 5—6-часовых серий объем информации составляет 2,7 Мбайт, что превышает половину емкости одного магнитного диска (4,8 Мбайт). Поскольку число дисков в комплекте ЭВМ СМ-4 ограничено, возникает проблема хранения этих данных. В отличие от данных климатологических наблюдений, которые подлежат длительному хранению, материалы турбулентных измерений сохраняются лишь до тех пор, пока не будут получены нужные статистические характеристики, т. е. пока они не будут обработаны по всему комплексу имеющихся программ.

Для управления работой ИБК ВММ по сбору и обработке информации разработан комплекс программ. Одна группа программ обеспечивает сбор и предварительную обработку числовых рядов с последующей записью их на магнитный диск, другая обеспечивает статистическую обработку числовых рядов (вычисление характеристик устойчивости, исследование статистических зависимостей, корреляционный и спектральный анализ). Как указано выше, один и тот же материал может обрабатываться с использованием всего комплекса различными программами. Третья группа программ обеспечивает получение ряда характеристик (средних значений, дисперсий, коэффициентов взаимных корреляций, коэффициентов пориантности и др.) в процессе самого эксперимента. Результаты обработки выдаются в виде таблиц, графиков в масштабе времени проведения измерений.

Как правило, в процессе эксперимента присутствует сам заказчик-исследователь. В его распоряжении находятся все перечисленные выше средства представления текущей информации, на основе которой он может судить об исследуемом процессе, в качестве работы измерительной аппаратуры, принимать те или иные решения.

В заключение следует отметить, что создание ИБК ВММ обеспечивает повышение эффективности и качества экспериментальных исследований. Измерительная система ВММ после включения в нее ИБК-7 приобрела новые функции — обеспечение оперативной автоматической обработки информации, взаимодействие в ходе эксперимента с объектом исследования (ОИ) в реальном времени. Повышение качества эксперимента обусловлено увеличением объема информации (возможность проведения комплексных экспериментов), повышением точности измерений, возможностью оперативного контроля эксперимента, улучшением метрологического обеспечения (сравнение датчиков перед экспериментом, контроль их работы), оперативностью обработки измерений.

В работе по созданию ИВК ВММ принимали участие Н. П. Тофинчук, Е. П. Ларичева, Н. Г. Стефанов, Л. А. Лунина, Л. А. Терсб, Л. М. Константинова, М. А. Нонинский, Н. П. Добычин, И. А. Сергеева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В. Н. Использование высотной метеорологической мачты ИЭМ для изучения пограничного слоя атмосферы. — М.: Гидрометеоиздат, 1970. — 144 с. (Труды ИЭМ, Вып. 12).
2. Системы автоматической обработки информации, получаемой на высотной метеорологической мачте ИЭМ // Н. Л. Бызова, В. Н. Иванова, Г. Б. Машкова, Н. Ф. Малурин, Г. Н. Соловьев. — Метеорология и гидрология, 1970, № 3, с. 122—128.

**ПОПЕРЕЧНАЯ АБСОЛЮТНАЯ ДИСПЕРСИЯ
КООРДИНАТ ЧАСТИЦ ПРИМЕСИ
В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ**

Е. К. ГАРСЕР, А. В. НАВДЕНОВ, Д. Б. УВАРОВ

1. Одной из трудных задач, связанных с расчетами рассеивания примесей от точечного источника в приземном слое атмосферы, является задача определения зависимости поперечной дисперсии

координат диффундирующих частиц от времени диффузии или расстояния. Гипотеза подобия лагранжевых характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы предоставляет новые возможности для вычисления поперечной дисперсии координат [4]. Особенно простые соотношения получаются при нейтральной стратификации. В настоящей работе обсуждаются результаты экспериментальной проверки одного из этих соотношений. В отличие от [2], где исследовалось поведение относительной дисперсии координат в зависимости от расстояния и времени диффузии, в настоящей работе рассматривается поперечная абсолютная дисперсия координат частиц примеси.

2. Согласно гипотезе подобия лагранжевых характеристик турбулентности в приземном слое атмосферы над плоской и однородной поверхностью [4], выражение для поперечной абсолютной дисперсии координат σ_y^2 можно записать в следующем виде:

$$\sigma_y^2(t) = u_*^2 t^3 F\left(\frac{h}{u_* t}, \frac{z_0}{u_* t}, \frac{u_* t}{|L|}\right), \quad (1)$$

где $L = \frac{u_*^2}{\alpha \frac{g}{T_0} \frac{q}{c_p \rho_0}}$ — масштаб Монокина—Обухова; α — постоянный

Кармана; u_* — скорость трения; ρ_0 — плотность воздуха; q — турбулентный поток тепла; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; g — ускорение силы тяжести; T_0 — средняя температура воздуха; t — время диффузии; z_0 — параметр шероховатости подстилающей поверхности; h — эффективная высота источника дыма; F — универсальная функция, вид которой должен определяться по данным наблюдений.

Для предельных времен диффузии, много больших $\frac{h}{u_*}$ и $\frac{z_0}{u_*}$, функция F стремится к константе при $|L| \rightarrow \infty$ и соотношение (1) приводится к виду

$$\sigma_y^2(t) = \alpha_y u_*^2 t^3, \quad (2)$$

где α_y — универсальная константа.

3. Для экспериментального определения границ применимости соотношения (2) и оценки вида функции F были использованы данные аэрофотосъемки дымовых струй. Методика получения информации о значениях σ_y и характеристиках приземного слоя изложена в [2, 6]. Условия экспериментов достаточно подробно описаны в [2]. Отметим только, что опыты были проведены на трех полигонах, ни один из которых не отвечал идеальным условиям однородности подстилающей поверхности для расстояний, больших 0,7—1,0 км от источника примеси и метеомачты. Более того, с точки зрения мезошероховатости подстилающей поверхности условия экспериментов на разных полигонах значительно отличались друг от друга. Данные 1975 г. относятся опытам, прове-

денным на первом полигоне (степная зона Украины), данные 1976 и 1977 гг. — на полигонах 2 (Казахстан) и 3 (Арабатская стрелка). Первый полигон — это ровная площадка размером 300×600 м, окруженная сельскохозяйственными угодьями (поля пшеницы, кукурузы и подсолнечника), с отдельными одноэтажными строениями. Второй полигон — площадка со следами старид в солончаковой почве, растительностью полупустынного типа — расположен в долине р. Или и окружен с одной стороны грядами холмов высотой 200—300 м, а с другой стороны — песчаными барханами высотой 15—20 м. Ширина долины приблизительно равна 1,5 км. Третий полигон — песчаная коса шириной около 1,0 км, окруженная с обеих сторон водной поверхностью. Основная масса опытов осуществлена при нейтральной стратификации и слабой неустойчивости приземного слоя атмосферы.

4. Поскольку по материалам аэрофотосъемки мы можем проанализировать непосредственно зависимость назначения диффузионных параметров только от расстояния до источника примесей, перейдем от расстояния ко времени диффузии по формулам [2]:

$$t = \frac{x}{u_c}, \quad (3)$$

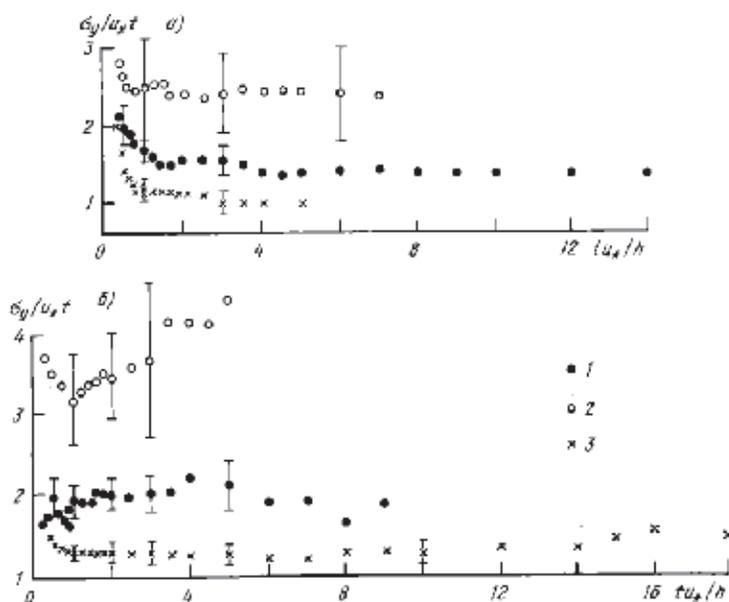
$$u_c = \frac{1}{z_0} \int_{z_0}^{\bar{z}_0} \bar{u}(z) dz, \quad (4)$$

где \bar{z}_0 — средняя за опыт высота видимой верхней границы струны дыма, полученная с помощью стереофотограмметрической съемки, u_c — средняя скорость ветра в слое от z_0 до \bar{z}_0 . На рисунке в качестве масштаба времени диффузии, характеризующего «пик» о начальных условиях, выбрано отношение $\frac{h}{u_c}$. Оно на два-три порядка больше $\frac{z_0}{u_c}$, что позволяет не учитывать влияние аргумента $\frac{z_0}{u_c}$ на функцию F . Значения h во всех опытах изменялись

в диапазоне от 2,0 до 5,5 м. Из рисунка *a* видно, что при $\frac{u_c t}{h} \ll 1$ изменения значений $F^{1/2}$ для 3 группы данных качественно мало отличаются друг от друга. При больших значениях аргумента значения функции $F^{1/2}$ колеблются в пределах статистического разброса данных около некоторого постоянного уровня. Но в отличие от поведения относительной дисперсии координат для тех же времен диффузии, полученной в [2] по этим же сериям экспериментов, значения $F^{1/2}$ для каждой группы резко отличаются друг от друга.

Так, например, постоянный уровень, вокруг которого колеблются значения $F^{1/2}$, по данным 1976 г., приблизительно равен 1,4, по данным 1976 г. — 2,4, а по данным 1977 г. — 1,0. При неустойчивой стратификации (рисунк б) ход функции $F^{1/2}$ по данным

1975 и особенно 1977 гг. качественно мало отличается от хода этой функции при нейтральной стратификации. Тем не менее влияние термической стратификации сказалось на некотором уменьшении значений функции F^{112} , по данным 1975 и 1977 гг., при малых $\frac{u_y t}{h}$, а главное — на росте абсолютных значений уровней, около которых происходит колебание значений F^{112} . Большой разброс экспериментальных данных 1976 г., связанный в какой-то степе-



Значения $\frac{\sigma_y}{u_y t}$ как функция $\frac{u_y t}{h}$ при $|L| \geq 100$ м для нейтральной (а), неустойчивой (б) стратификации:
1—3 — 1, 2, 3-я полигоны соответственно

ни с малым числом опытов, не позволяет говорить определенно о форме зависимости σ_y от t при неустойчивой стратификации (рисунк б). Тем не менее, по-видимому, в этих опытах линейная зависимость σ_y от t не наблюдалась. Так же как и для условий нейтральной стратификации, значения функции F^{112} , по данным 1976 г., оказались больше тех, которые получены по данным 1975 и 1977 гг.

Таким образом, проведенные нами измерения подтверждают характер зависимости σ_y от времени диффузии в нейтрально-стра-

тифицированном приземном слое атмосферы, предсказываемый теорией подобия. Более того, режим подобия, касающийся зависимости σ_y от L , сохраняется и в условиях слабой неустойчивости. В то же время приведенные данные показывают, что функция F не универсальна. Это может быть результатом того, что не учтен какой-то фактор, который в действительности оказывает существенное влияние на значения F . Изменчивость абсолютной дисперсии координат в разных группах опытов может быть связана с локальными особенностями местности. На полигоне 2 в среднем наблюдалась в 1,5 раза меньшая скорость трения, чем на полигонах 1 и 3, параметр микрошероховатости был наименьшим, в то время как значения $\frac{\sigma_y}{u_* t}$ 1976 г. при всех $\frac{u_* t}{h}$ систематически были большими, чем по данным 1975 и 1977 г., хотя, казалось бы, уменьшение шероховатости должно уменьшить и значение σ_y . Значит, уменьшение микрошероховатости в данном случае вряд ли может быть единственной причиной уменьшения значений $\frac{\sigma_y}{u_* t}$ при переходе от одного полигона к другому. В то же время известно, что σ_y в значительной степени зависит от низкочастотных колебаний струи пририси, генерируемых мезомасштабными неоднородностями подстилающей поверхности.

Учитывая, что для полигона 2 характерна наибольшая мезошероховатость подстилающей поверхности по сравнению с полигонами 1 и 3, отличия приведенных выше данных друг от друга могут быть связаны с различиями именно мезошероховатости полигонов. В пользу этого предположения свидетельствуют данные о значениях σ_y при малых временах диффузии, когда вертикальные размеры струи еще незначительны и неоднородностью потока по вертикали можно пренебречь, а в формировании значений σ_y участвует весь спектр турбулентных вихрей. В этом случае можно написать приближенное соотношение

$$\sigma_y^2 \approx \sigma_c^2 t^2, \quad (5)$$

из которого следует, что для малых времен диффузия $\frac{\sigma_y}{u_* t} \approx \frac{\sigma_c}{u_*}$. Это даст возможность сравнить полученные результаты при $\frac{u_* t}{h} < 1$ с имеющимися в литературе данными измерений значений $\frac{\sigma_c}{u_*}$. Из данных рисунка а, относящихся к значению $\frac{u_* t}{h} = 0,5$, следуют оценки значения $\frac{\sigma_c}{u_*}$, равные 2,0; 2,6 и 1,4 для 1, 2 и 3-го полигонов соответственно. Согласно же [3], это отношение принимало следующие значения: 2,0 — в О'Нейле, Небраска, 1956 г., по измерениям на высоте 2 м; 2,2 — там же в 1953 г., на высоте 12 м; 2,6 — в Раунд-Хилле, Массачусетс, на высоте 2 м; 1,3 — в

Бруклеве, Лонг-Айленд; 2,0 — в Пикскилле, штат Нью-Йорк, на высоте 100 м. В [1] приведены результаты более поздних экспериментов в природных условиях, а также данные, полученные в лаборатории. По лабораторным данным разных авторов, отношение $\frac{\sigma_y}{u_*}$ изменялось от 1,4 до 1,7. По данным измерений, выполненных в атмосфере, оно изменялось от 1,6 до 2,2. Диффузионные измерения в приземном слое [5] дают значение $\frac{\sigma_y}{u_*}$, равное 2,1.

Таким образом, полученные нами оценки $\frac{\sigma_y}{u_*}$ удовлетворительно согласуются с литературными данными и подтверждают высказанное в [3] предположение о том, что различия $\frac{\sigma_y}{u_*}$ связаны с разной мезошероховатостью мест измерений.

Зависимость $\frac{\sigma_y}{u_* t}$ от локальных условий местности затрудняет оценку универсальной константы, так как функция $F\left(\frac{h}{u_* t}, \frac{z_0}{u_* t}\right)$, по нашим данным, в предельном режиме не равна α_y из-за несоответствия реальных условий в опытах идеализированным условиям, пригодным для использования гипотезы подобия лагранжевых характеристик турбулентности. По-видимому, для описания процесса диффузии примеси в приземном слое атмосферы над реальной подстилающей поверхностью необходим учет ее мезошероховатости.

На основе приведенного анализа можно высказать предположение о том, что в условиях нейтральной стратификации приземного слоя и при временах диффузии $t \gg \frac{h}{u_*}$ поперечная абсолютная дисперсия координат σ_y^2 над реальной подстилающей поверхностью будет описываться формулой вида

$$\sigma_y^2(t) = \alpha_y u_*^2 t^2 f\left(\frac{z_{00}}{z_0}\right), \quad (16)$$

где z_{00} — параметр мезошероховатости.

Очевидно, что при $z_{00} \rightarrow z_0$ функция $f\left(\frac{z_{00}}{z_0}\right)$ должна стремиться к единице, и в этом случае может быть определена константа α_y .

Поскольку диффузионные измерения 1977 г. были проведены на плоской косе, окруженной с двух сторон водной поверхностью, то можно предположить, что отношение $\frac{z_{00}}{z_0}$ в этой серии экспериментов мало отличалось от единицы. Это позволяет считать, что истинное значение универсальной константы близко к единице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Армель Н. З., Надежина Е. Д. Бесразмерные характеристики турбулентности при разных условиях стратификации. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1976, т. 12, № 6, с. 802—809.
2. Гартгер Е. К., Найденков А. В., Уваров Д. Б. О поперечной диффузии в приземном слое атмосферы. — Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1980, т. 16, № 4, с. 368—375.
3. Лямли Дж. Л., Пановский Г. А. Структура атмосферной турбулентности. — М.: Мир, 1966. — 264 с.
4. Мокш А. А., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика, Ч. 1. — М.: Наука, 1965. — 639 с.
5. Озипов Ю. С. Связь поперечного рассеяния примесей в приземном слое атмосферы с характеристиками турбулентности. — Метеорология и гидрология, 1972, № 6, с. 42—50.
6. Оценка возможности использования трассеров для проверки гипотезы подобия лагранжовой турбулентности в приземном слое атмосферы / Е. К. Гартгер, В. Ф. Конарев, А. В. Найденков, Д. Б. Уваров. — Труды ИЭМ, 1970, вып. 15(60), с. 78—99.

ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ НА ВЫСОТАХ
80-100 КМ РАДИОМЕТЕОРОМ МЕТОДОМ

И.А. Дусанко, А.Д. Орманский, Ю.И. Португалин

Исследования динамики атмосферы, проводимые в последние десятилетия различными методами, убедительно свидетельствуют о том, что во многих случаях атмосфера в целом ведет себя, как единая сложная термодинамическая система, и синоптические процессы в отдельных ее слоях протекают не изолированно, а в зависимости от синоптических процессов на самых различных высотных уровнях. В связи с этим становится все более очевидным, что дальнейший прогресс в прогнозировании погодных явлений и изменений климата связан с необходимостью учета метеорологических условий в разных слоях атмосферы, вплоть до десятков и сотен километров.

Весьма существенную роль в исследовании динамики верхней атмосферы играет радиометеорологический метод (метод Д2), который дает информацию о режиме ветра нижней термосферы, часто называемой метеошной зоной (80-100 км). Относительно невысокая стоимость требуемой для реализации этого метода аппаратура, сравнительная простота ее эксплуатации, независимость наблюдений от метеорологических условий и времени суток, простота физической интерпретации результатов измерений — все это способствовало довольно широкому внедрению радиометеорологического метода в практику исследований динамики нижней термосферы.

Следует добавить, что на сегодняшний день радиометеорологический метод является практически единственным методом, обеспечивающим получение наиболее полной и достоверной информации о приливных движениях воздушных масс верхней атмосферы, энергетический вклад которых в динамику нижней термосферы сопоставим с вкладом преобладающего ветра.

Особенно интенсивно стали развиваться работы по внедрению радиометеорологического метода в период Международного геофизического года (МГГ) и последовавшего за ним Международного года спокойного Солнца (МГСС). Именно во время МГГ были заложены основы радиометеорологических исследований динамики нижней термосферы в СССР. Первые наблюдения ветра методом Д2

в Советском Союзе были выполнены в 1959 г. Харьковским политехническим институтом (ХПИ) [10, 13].

Приобретенный в ХПИ опыт по разработке радиометеорной аппаратуры и методики наблюдений ветра был заимствован рядом организаций Советского Союза, в том числе и Институтом экспериментальной метеорологии (ИЭМ)* Госкомгидромета СССР.

С января 1964 г. ИЭМ начал регулярные наблюдения в Обнинске [22].

Уже на первом этапе организации в ИЭМ исследований динамики атмосферы радиометеорным методом возник вопрос о выборе генерального направления развития этих исследований. Имевшийся в то время в различных организациях опыт радиометеорных наблюдений ветра подсказывал два возможных направления. Одним из них было создание метеорной РЛС высокой эффективной чувствительности, оборудованной висотомерным устройством и позволяющей изучать тонкую вертикальную структуру поля ветра на высотах 80–100 км. При этом было очевидно, что с учетом материальных и людских ресурсов, которыми располагал коллектив, занимавшийся в ИЭМ радиометеорными исследованиями ветра, наблюдения с помощью такой РЛС больше, чем в одном пункте, организовать не представлялось возможным ввиду высокой стоимости аппаратуры, сложности ее эксплуатации и обработки экспериментального материала. Отметим, кстати, что именно эти сложности вынуждают исследователей, использующих метеорные РЛС с висотомерами, проводить измерения лишь в ограниченные периоды времени.

Другим возможным направлением было создание сравнительно недорогих и несложных в обслуживании метеорных РЛС средней эффективной чувствительности, не оснащенных висотомерами, но обеспечивающих получение регулярной информации о ветре на некоторой средней высоте метеорной зоны, и размещение таких станций в ряде географических пунктов с целью проведения в них систематических многолетних измерений для изучения временных и пространственных вариаций параметров ветрового режима нижней термосферы и их межгодовой изменчивости.

Нужно подчеркнуть, что последнее направление, предусматривающее возможность исследования наиболее важных с точки зрения метеорологии крупномасштабных динамических процессов, формирующих глобальную циркуляцию в области нижней термосферы, в большей степени, чем изучение в одном пункте вертикальной структуры режима ветра, соответствовало задачам Госкомгидромета. Исходя из этого, второе направление развития радиометеорных исследований динамики нижней термосферы и было выбрано в качестве основного для ИЭМ.

* В то время — филиал Института прикладной геофизики, Москва.

С июня 1964 г. ИЭМ начал регулярные наблюдения ветра методом ДЗ на ст. Дельта ($50,37^{\circ}\text{N}$, $58,03^{\circ}\text{E}$) [3, 21], а с 1967 г. — в Актаритиде, на ст. Молодежная [21]. Выбор этих пунктов был обусловлен следующими соображениями. Во-первых, высокоширотная нижняя термосфера как южного, так и северного полушарий представляла собой в то время по существу "белое пятно". Имелись лишь результаты кратковременных измерений, выполненных радиометодом австралийскими исследователями в 1957 г. на ст. Маусон, Актаритиде [23]. Во-вторых, в этих пунктах намечалось создание станций ракетного зондирования атмосферы. Организация наблюдений в одних и тех же пунктах двумя методами позволяла бы проводить совместный анализ радиометрических и ракетных данных, что способствовало бы более эффективной интерпретации результатов измерений ветра на разных высотах.

Руководствуясь этими соображениями, в 1967 г. ИЭМ наладил измерения ветра радиометрическим методом в Волгоград/В, 25° , где к тому времени уже действовала станция ракетного зондирования атмосферы.

В 1978 г. ИЭМ установил радиометрическую станцию в Хабаровске ($48,31^{\circ}\text{N}$, $135,10^{\circ}\text{E}$), с помощью которой в течение ряда лет было проведено несколько продольных циклов наблюдений. По результатам этих наблюдений был выявлен ряд особенностей нижней атмосферы метеорной зоны над Дальневосточным речным, а также обнаружены некоторые долготные эффекты в поведении параметров ветрового режима на высотах 80-100 км [14].

В 1970 г. в рамках научно-технического сотрудничества между СССР и ГДР по проблеме "Космическая метеорология" ИЭМ совместно с Обсерваторией ионосферных исследований (ОИИ) Центрального института солнечной земной физики АН ГДР организовал измерения ветра методом ДЗ в Килдунгсборне, ГДР [31], которые ведутся регулярно и в настоящее время. С помощью установленной ИЭМ² в Килдунгсборне метеорной РЛС были выполнены работы с методической точки зрения эксперименты по оценке пригодности для измерений параметров режима ветра на высотах 80-100 км применяемого в ОИИ с 1957 г. метода рассеяния радиоволн низкочастотного диапазона ионосферными неоднородностями (метод ДИ) [31]. Эти исследования позволили сделать вывод о том, что данные измерений методом ДИ в основном правильно отражают действительную картину движений воздушных масс метеорной зоны и, таким образом, эти данные совместно с результатами наблюдений методом ДЗ могут быть использованы для изучения закономерностей режима ветра на высотах около 100 км.

* В организации радиометрических измерений в Килдунгсборне принимал участие Аляковский институт радиозлектроники.

Проведенные в ОИИ и ИЭМ измерения дают экспериментальный материал для исследования пространственной структуры синоптических процессов в нижней термосфере над Европой, а также характера их межгодовой изменчивости. Результаты многолетних совместных исследований, выполненных в ОИИ и ИЭМ, опубликованы в последней в свет в 1978 г. монографии, подготовленной специалистами обеих организаций [2].

Ряд полезных выводов о динамике атмосферы метеорной зоны, в частности о параметрах двухточечных колебаний в этой области атмосферы [25, 30], получен по результатам совместных исследований, выполненных в период 1970-1977 гг. в рамках научно-технического сотрудничества между СССР и Францией по проблеме "Космическая метеорология и аэронавигация".

ИЭМ участвует в проведении экспериментов, предусмотренных программой Международного глобального геофизического проекта по исследованию ветров (*GRAMWSP*), координированной программой по исследованию приливов (*CTOP*). Сотрудники ИЭМ принимали активное участие в разработке выданного по инициативе Бюро секции метеорных исследований Межведомственного геофизического комитета при АН СССР проекта глобальных координированных наблюдений метеоров (*GLOBMET*).

На состоявшемся в Оттаве (Канада) в мае 1968 г. заседании Бюро Специального Комитета солнечно-земной физики (*SCSSTEP*) проект ГЛОБМЕТ был утвержден в качестве международного проекта, который будет осуществляться под эгидой *SCSSTEP*.

Важным вкладом в изучение динамических процессов синоптических масштабов на высотах метеорной зоны являлись координированные измерения радиометеорным методом, выполненные ИЭМ в разные годы в тесном сотрудничестве с другими организациями СССР [4, 23, 24]. Первые опыты по проведению таких измерений относятся к 1965-1966 гг., когда по инициативе В.А. Казеева были выполнены синхронные наблюдения в семи пунктах СССР - в г. Уфе, Омск, Томск, Харьков, Киев, Душанбе, Фрунзе [23]. На основании анализа результатов этих наблюдений впервые был сделан вывод о том, что преобладающая циркуляция атмосферы на высотах метеорной зоны представляет собой, по крайней мере в зимние месяцы, крупномасштабные вихревые образования, аналогичные тем, которые наблюдаются в стратосфере.

На всех пунктах ИЭМ измерения проводились преимущественно циклически, по *vescovary* дней в месяц. По результатам таких измерений можно было изучать сравнительно узкий круг вопросов динамики атмосферы метеорной зоны, например, таких как сезонные вариации параметров преобладающих и приливных ветров, зависимость этих параметров от широты и экваторные другие.

Качественный скачок в развитии исследований в ИЭМ динамических

процессов на высотах 50-100 км был сделан в 1972 г., когда в ноябре были начаты аэроспутные измерения, продолжавшиеся практически непрерывно в течение нескольких месяцев. Совместный анализ результатов этих измерений в данных аэрологического зондирования позволил сделать вывод о том, что в зимний период наблюдается сильное динамическое взаимодействие между нижней термосферой и более низкими уровнями атмосферы и что в этот период существует единая для всех высот, вплоть до нижней термосферы, система циклонической циркуляции [1].

Опыт проведенный вшеупомянутых непрерывных измерений наглядно продемонстрировал их преимущества в отношении информативности по сравнению с эпизодическими наблюдениями. Наряду с этим стало ясно, что для проведения в будущем продолжительных циклов непрерывных наблюдений необходимо кардинально модернизировать аппаратуру, существенно повысить ее надежность, автоматизировать процесс измерений и обработки их результатов. Такая модернизация была осуществлена в 1973-1974 гг. В 1974 г. на метеороид РЭС, действующей в Обнинске, было установлено устройство, автоматизирующее первичную обработку данных. Оно было разработано на заводском уровне Карлковским институтом радиоэлектроники по техническому заданию ИЭМ [12]. В тот же период метеороид РЭС в Обнинске была дополнена разработанным в ИЭМ управляемым антенным коммутатором, применение которого обеспечивало возможность получать информацию о ветре одновременно из четырех направлений (парные эксперименты с использованием такого коммутатора были выполнены в конце 1972 г. [25]).

С помощью такого коммутатора реализуется по сути дела новый способ радиометеорных измерений ветра, который по сравнению с двумя другими наиболее распространенными методами (Мэннинг и Гринхау) имеет ряд преимуществ. При наблюдениях одновременно в четырех направлениях существенно повышается информативность результатов измерений. В частности, помимо традиционного для радиометеорного метода изучения преобладающих и примычных составляющих ветра, способ зондирования одновременно в четырех направлениях позволяет исследовать параметры короткопериодических процессов, для чего в ИЭМ была разработана специальная методика анализа экспериментальных данных [4]. Другим достоинством рассматриваемого способа является то, что при такой же эффективной чувствительности метеороид РЭС, как и в случае наблюдений методом Мэннинга или Гринхау, статистическая обеспеченность результатов измерений одновременно в четырех направлениях возрастает более чем в три раза и, следовательно, повышается точность определения скорости используемых для анализа среднечасовых скоростей ветра.

Упомянутые преимущества способа измерений одновременно в четырех направлениях дают право считать его оптимальным при радиометеорных наблюдениях ветра.

Автоматизация процесса измерений и надежность работы аппаратуры были доведены до такой степени, что на ее обслуживание во время наблюдений требовалось не более 4-5 ч в сутки, что позволяло вести круглосуточные измерения силами одного оператора. Весь комплекс мероприятий по модернизации аппаратуры обеспечил возможность проводить в Обнинске практически непрерывные наблюдения ветра, которые начались в 1974 г. и продолжаются до настоящего времени.

Переход к непрерывным наблюдениям с помощью метеорной РЛС, работающей в режиме зондирования одновременно в четырех направлениях, и большой поток получаемой при этом информации потребовал соответствующей модификации алгоритмов и программы вторичной обработки данных, результатом которой явилось создание комплексной методики обработки экспериментальных данных [14]. В последующие годы, в связи с изменением типов применяемых в ИЭМ электронно-вычислительных машин, в программы обеспечения методики вносились необходимые коррективы.

К настоящему времени в ИЭМ во всех пунктах наблюдений получены уникальные по продолжительности ряды данных о динамике атмосферы метеорной зоны. Анализ этих рядов, а также опубликованных данных о циркуляции атмосферы на высотах 70-110 км, полученных другими организациями, позволял получить ряд важных с научной и прикладной точки зрения результатов, отражающих закономерности временных и пространственных вариаций параметров поля ветра средней термосферы.

Далее кратко в обобщенном виде изложены некоторые из этих результатов, наиболее хорошо отражающих направленность проводимых в ИЭМ исследований динамики атмосферы метеорной зоны.

Сезонный анализ среднесезонных значений скоростей ветра в различных географических пунктах северного полушария, выполненный совместно со специалистами Гидрометцентра СССР [15], позволил впервые построить для всех месяцев года карты-схемы возможного расположения циркуляционных систем в метеорной зоне. Одна из таких карт (для января) приведена на рис. 1. Ход краев на этих картах указывает на то, что на высотах около 90-100 км во все сезоны года существуют глобальные динамические образования, в ряде случаев аналогичные тем, которые наблюдаются на уровнях стратомезосферы (глобальный циркуляционный земной циклон на рис. 1). Эти глобальные динамические структуры подтверждаются значительными сезонными модификациями в тем смысле определяют своеобразный динамический режим сезонных вариаций ветра в метеорной зоне.

Анализ длительной изменчивости параметров сезонного кода зонального и меридионального ветра показал, что дисперсия среднесезонных значений скоростей ветра по долготе существенно меньше, чем по широте. Этот результат свидетельствует о том, что в качестве первого приближения

в разработке среднесиголетних моделей ветрового режима в области мезоцикли — нижней термосферы может быть взята среднесиголетняя модель.

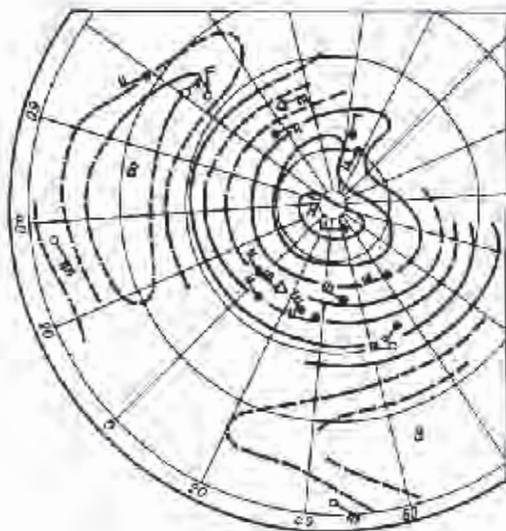


Рис. 1. Карта-схема возможного расщепления циркуляционной системы на высоте около 95 км для января

На рис. 2 приведена схема преобладающей в течение года циркуляции на различных широтах на высоте ~ 95 км. На этой схеме хорошо выделены экваториальная область пассатных течений, области струйных течений с сильными западными ветрами в субтропических и умеренных широтах обеих полушарий и характерные зоны высокоширотной циркуляции. Таким образом, можно утверждать, что в метеорной зоне существуют действующие постоянно в течение года восточники, поддерживающие среднесиголетний режим циркуляции.

На основе обобщения результатов многолетних измерений радиометеорологическим методом, выполненных в ИЭМ, а также данных измерений, полученных другими организациями (всего более 35 пунктов), нами была построена для всех сезонов года среднесиголетняя высотнo-широтная модель циркуляции на высотах 70—110 км для северного и южного полушарий. Эта модель существенно более детальна по сравнению с ранее известными мо-

делями для северного полушария. Для южного полушария в указанном интервале высот такая модель построена впервые. Методика построения модели подробно описана в [17, 18].

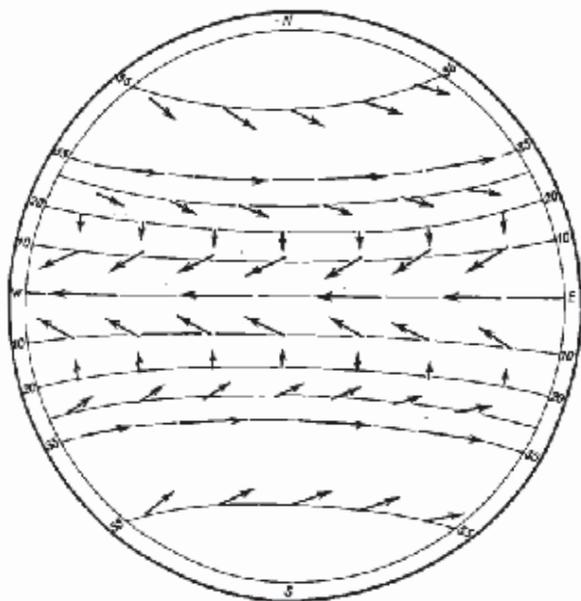


Рис. 2. Схема глобальной, преобладающей в течение года циркуляции атмосферы на высоте около 95 км.

В качестве примера на рис. 3 а, б приведена модель поля зонального ветра для января и июля. Из данных этого рисунка следует важный вывод о том, что циркуляция в северном и южном полушариях не является полностью симметричной относительно экватора, как это предполагалось ранее. Кроме того, приведенные высотно-широтные разрезы свидетельствуют о том, что на формирование циркуляции в метеороидной зоне атмосферы оказывают влияние как динамические системы стратомезосферы, так и циркуляционные структуры термосферы. Преобладание западных ветров в умеренных и субтропических широтах обоих полушарий в основные сезоны года показывает, что по своему характеру зональная циркуляция в метеороидной зоне ближе к циркуляции в тропосфере, чем в стратомезосфере.

На основании анализа зависимостей скоростей меридионального ветра от долготы был сделан принципиальный вывод о том, что меридиональная

циркуляции в области мезоплазмы - нижней термосферы имеет преимущественно агеострофический характер; это позволяет связывать происходящие соответствующих меридиональных ветров с близкими силами. Значения обеспечивающие такую циркуляцию коэффициентов горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии близки к соответствующим значениям в тропосфере и примерно на порядок больше, чем значения для стратосферы.

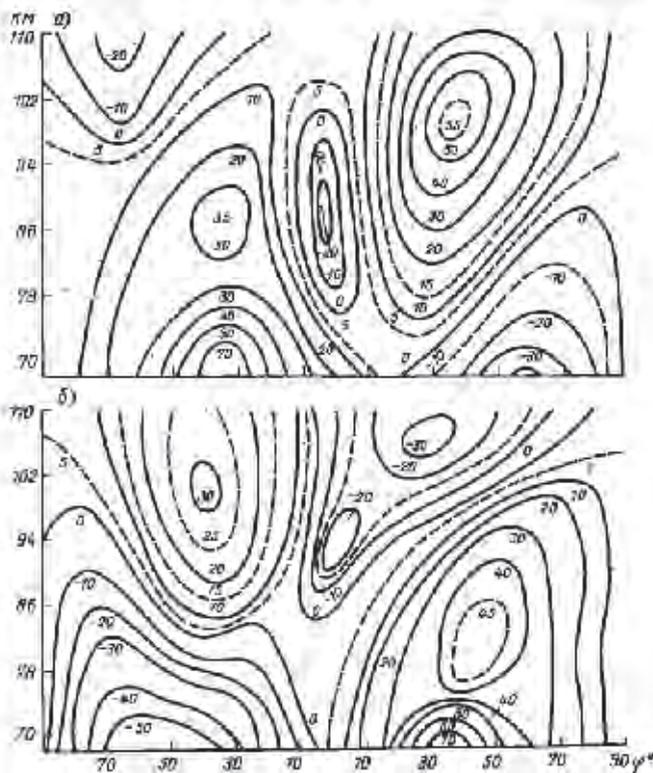


Рис. 5. Среднемесячные значения зонной скорости циркуляции атмосферы на высотах 70-110 км для января (а) и июля (б)

В [20] было показано, что в метеорной зоне атмосферы могут существовать глобальные ячейки циркуляции типа ячеек Гадлея и Ферреля, наблюдаемых в тропосфере. Если учесть при этом, что в низких широтах в метеорной зоне практически в течение всего года господствуют восточные

ветры с меридиональной составляющей, направленной к экватору (см. рис.2) (что типично и для пассатных течений в тропосфере), то можно сделать вывод о том, что по ряду своих характерных свойств средния годовая циркуляция в метеорной зоне аналогична циркуляции в тропосфере. В то же время на годовые вариации параметров ветрового режима в области мезопаузы – нижней термосферы существенное влияние оказывают глобальные стратомезосферный зимний циклон и летний антициклон.

Данные многолетних измерений скоростей ветра, проведенных ИЭМ в высотках в умеренных широтах, позволили оценить степень межгодовой изменчивости параметров ветрового режима в метеорной зоне. Было установлено, что среднemesачные значения скоростей ветра претерпевают значительные межгодовые вариации в характерном временном порядке нескольких лет (в основном с периодами 3–4 года). Такие вариации наглядно иллюстрируются рис. 4, на котором в качестве примера представлены по результатам измерений на о. Кейсы, в Обнинске и на от. Молодежная в январе и июле 1964–1981 гг. Обращает на себя внимание тот факт, что в январе ветер изменяется от года к году не только по величине, но и по направлению. Эти результаты свидетельствуют о необходимости систематически многолетних наблюдений ветра радиометрами методом.

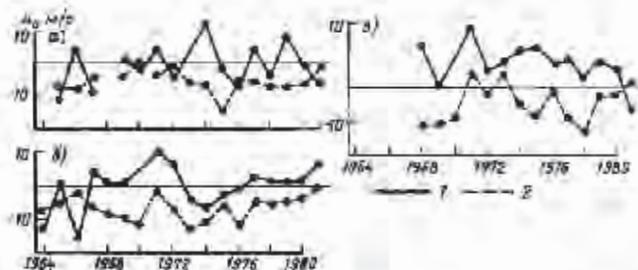


Рис. 4. Межгодовые вариации среднemesачных значений скорости меридионального ветра для января (1) и июля (2) по данным измерений в 1964–1981 гг. на о. Кейсы (а), в Обнинске (б) и на от. Молодежная (в).

Важным итогом исследований, выполненных нами совместно со специалистами Гидрометцентра СССР и ДНИ, явился вывод о закономерностях межгодовой изменчивости прогов весенней перестройки циркуляции в метеорной зоне. Оказалось, что сроки весенних перестроек в метеорной зоне значительно изменяются от года к году и при этом коррелируют с соответствующими сроками перестроек циркуляции в стратосфере. На рис. 5, взятом из

[16], приведены данные о сроках перестроек на высотах метеорной зоны в стратосфере, подтверждающие этот вывод. Как видно из этого рисунка, весенняя перестройка циркуляции в метеорной зоне наступает на несколько недель раньше, чем в стратосфере, следовательно, радиометеорные данные о ветре могут быть использованы для прогнозирования дат весенних перестроек в стратосфере. В то же время известно, что информация о характере сезонных перестроек в стратосфере является важной для долгосрочного прогноза погоды. Таким образом, полученные нами результаты имеют определенное практическое значение.

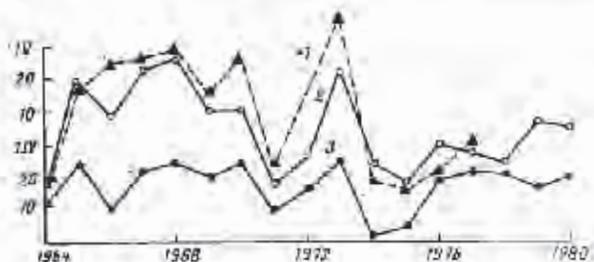


Рис. 5. Изменения от года к году сроков наступления весенней перестройки циркуляции в стратосфере и на высоте около 95 км: 1 - 10 гПа (по Пездо); 2 - 10 гПа (по Угрумову); 3 - 95 км

Значительное внимание в наших работах уделяется анализу закономерностей межсуточных вариаций параметров ветрового режима. На основе спектрального анализа многолетних ежедневных рядов измерений было установлено, что основной вклад в дисперсию скоростей ветра дают колебания в интервале периодов, близких к естественным синоптическим периодам в тропосфере (от нескольких суток до 2-3 недель). Кривые пространственных масштабов возмущений ветрового режима с характерными синоптическими периодами, основанные на анализе результатов синхронных наблюдений в нескольких пунктах [19], показали, что эти масштабы изменяются от 1500 до 3000 км и более. Кроме того, как на основе анализа эмпирических данных, так и на основе численного моделирования было показано, что на высотах метеорной зоны могут существовать распространяющиеся планетарные волны. Так, например, в процессе выполнения работ с бредуцскими специалистами впервые был сделан вывод о том, что колебания скоростей ветра с периодом, близким к двум суткам, обусловлены распространяющимися с востока на запад планетарными волнами с зональным волновым числом $S = 3$ [27]. Впоследствии нами было показано, что типично

рода глобальные колебания могут возбуждаться в тропосфере асимметричным относительно экватора истрчинном.

Как уже отмечалось, метод радиолокации метеорных следов дает возможность исследовать и внутрисуточные колебания скоростей ветра, обусловленные в первую очередь приливными колебаниями атмосферы. Анализ результатов многолетних наблюдений на различных широтах позволил установить основные закономерности сезонного и широтного хода параметров приливных колебаний и оценить степень их межгодовой изменчивости. На рис. 6 а, б приведены среднимноголетние широтные зависимости амплитуд

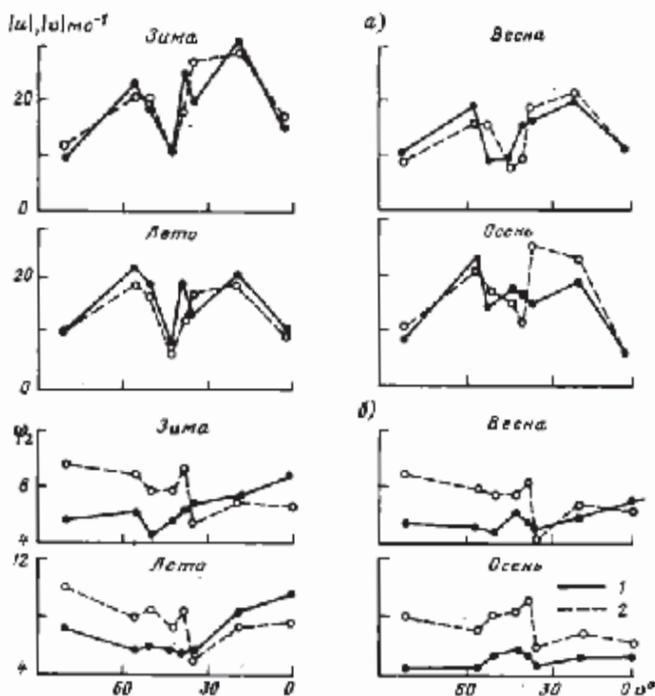


Рис. 6. Широтный ход среднимноголетних значений амплитуд (а) и фаз (б) полусуточного прилива на высоте около 95 км для различных базисов года: 1 - меридиональная, 2 - зональная составляющие

и фаз полусуточных приливных колебаний ветра в метеорной зоне, позволяющие сделать принципиальный вывод о том, что в отличие от классической теории атмосферных приливов значительную роль в формировании результирующей структуры приливных колебаний на высотах 80-100 км иг-

равноасимметричные моды полусуточного прилива. Этот результат приводит к необходимости пересмотра существующих моделей источника атмосферных приливов, которым, как известно, является в первую очередь озенный слой. С помощью развитой в ряде работ сотрудников ИЭМ численной модели распространения приливных колебаний в атмосфере [7, 8] можно проводить исследования этого важного атмосферного процесса на более глубокой физической основе.

Как упоминалось выше, разработанная в ИЭМ система одновременного радиометеорного зондирования одновременно в четырех направлениях позволила эффективно исследовать короткопериодные флуктуации скоростей ветра, связанные с распространением в метеорной зоне внутренних гравитационных волн (ВГВ) [6]. С помощью маложонной в [4] метеошки были оценены такие важные параметры внутренних гравитационных волн, как горизонтальные фазовые скорости, горизонтальные длины, амплитуды и углы, под которыми они распространяются к горизонту. Было показано, что многие из наблюдаемых на высотах 80-100 км ВГВ связаны с активными синоптическими образованиями (циклоны, фронты и т.д.) в тропосфере. Этот результат имеет важное значение для понимания механизмов связей между различными слоями атмосферы. Успешно развиваются работы и по численному моделированию распространения ВГВ в атмосфере [5].

Приведенный здесь краткий перечень результатов свидетельствует о том, что в ИЭМ с помощью метода радиолокации метеорных следов проводится обширный комплекс исследований динамических процессов в области мезопланет-нижней термосферы с широким интервалом периодов - от нескольких десятков минут до десятков лет.

Выполненные исследования дали сотрудникам ИЭМ необходимый материал для разработки научно обоснованных рекомендаций по дальнейшему развитию сети радиометеорных станций, наблюдения на которой позволят осуществлять мониторинг динамического состояния верхней атмосферы. Такого рода регулярный контроль за параметрами ветрового режима представляет значительный интерес как для понимания механизмов формирования общей циркуляции атмосферы, так и для решения ряда прикладных задач в области физики ионосферы, космической метеорологии, прогнозирования состояния средней атмосферы и т.д.

В настоящее время в соответствии с планом НИР и ОКР Госкомандромета СССР на 1980-1985 гг. в ИЭМ разрабатывается метеорная РЛС с учетом новейших достижений в области конструирования таких РЛС, а также с учетом накопленного нами опыта в этом деле. В разрабатываемой РЛС реализованы принципы измерений одновременно в четырех направлениях, применена цифровая парачетная обработка результатов наблюдений с использованием алгоритма, основанного на дельте частоты опорного сигнала на несколько десятков герц. По замыслу эта РЛС должна удовлетворить требова-

никам, предъявляемым к сетевой аппаратуре. Предполагается изготовить небольшую серию таких РЭС и с их помощью расширить подведомственную Госкомгидромету сеть пунктов радиометеорологических наблюдений ветра.

Список литературы

1. Дьяченко В.А., Лисенко И.А., Портнягина Ю.И. Особенности преобладающей циркуляции в нижней термосфере средних широт в земный период 1972/73 г. - Труды Всесоюзного совещания по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере. Обнинск, 1973. М., Гидрометеонадат, 1976, с. 121-130.
2. Измерение ветра на высотах 90-100 км наземными методами. Под ред. Ю.И. Портнягина, К. Шпренгера. - Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 343 с.
3. Ильичев В.Д., Лисенко И.А., Орлянский А.Д. Результаты измерений ветра на высотах 80-100 км методом радиолокации метеорологических следов на ст. Молодежная, о. Хейса и в Обнинске. - Труды ИЭМ, 1972, вып. 1(34), с. 47-65.
4. Казанников А.М. Методика и некоторые результаты определения параметров ИГВ в нижней термосфере по данным радиометеорологического зондирования в полярных широтах. - Исследование оптического излучения ночного неба. 14-е совещание по полярным сияниям и свечению ночного неба. Якутск, 1978. Якутск, 1979, с. 30-34.
5. Казанников А.М., Кайдалов О.В., Соловьева Т.В. Сезонные вариации мелкомасштабных движений на высотах 80-100 км. - Тезисы докладов III Всесоюзного совещания по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере. Обнинск, 1979, с. 65-66.
6. Казанников А.М., Портнягина Ю.И. О некоторых результатах исследований внутренних гравитационных волн по данным радиометеорологических наблюдений. - Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1981, т. 17, № 1, с. 85-98.
7. Кайдалов О.В. Моделирование приливных явлений в метеорологической зоне атмосферы. Численная модель для исследования колебаний атмосферы. II. - Труды ИЭМ, 1978, вып. 9(85), с. 3-8.
8. Кайдалов О.В., Семезовский Е.В. Моделирование приливных явлений в метеорологической зоне атмосферы. Физико-математическая постановка задачи. I. - Труды ИЭМ, 1977, вып. 6(74), с. 3-8.
9. Каримов К.А., Лисенко И.А., Портнягина Ю.И. Результаты измерений ветра в нижней термосфере методом радиолокации метеорологических следов. - В кн.: Солнечно-атмосферные связи. Л., Гидрометеоиздат, 1974, с. 154-163.
10. Камеев Б.Л., Лисенко И.А. Исследование циркуляции атмосферы на высоте 80-100 км. - Ионосферные исследования, 1961, № 9, с. 7-13.
11. Комплексная методика обработки результатов измерений дрейфов метеорологических следов.

- ных следов/ А.А. Таврилан, В.А. Дыченко, И.Д. Илличев и др. - Труды Всесоюзного совещания по исследованию примитивных процессов в верхней атмосфере. М., Гидрометеоиздат, 1976, с. 291-300.
12. Далуган М.Ф., Онуфриев В.П. Цифровая обработка радиометеорной информации. - Б.лн.: Радиотехника. Караков, Изд-во ИТ, 1973, вып.24, с.53-59.
13. Лисенко И.А. Воздушные течения в метеорной зоне по радиолокационным наблюдениям. - *Астрономический журнал*, 1963, т. 40, вып. 1, с. 161-170.
14. Макаров Н.А. Приспадающий ветер на высотах 80-100 км на различных долготах в зимний и весенний периоды 1976-1977 гг. - *Метеорология и гидрология*, 1981, № 12, с. 41-45.
15. Мухина Л.С., Петрослав М.А., Портнягин Е.И. О циркуляционных сменах в северном полушарии на высотах 80-100 км. - *Метеорология и гидрология*, 1977, № 1, с. 20-29.
16. Мухина Л.С., Петрослав М.А., Портнягин Е.И. Сезонные перестройки циркуляции в метеорной зоне (80-100 км) и их связь с процессами в стратосфере. - *Метеорология и гидрология*, 1981, № 9, с. 5-11.
17. Портнягин Е.И. Высота-широтная структура среднегодового зонального ветра в области мезопаузы - нижней термосферы. - *Метеорология и гидрология*, 1982, № 9, с. 34-41.
18. Портнягин Е.И. Годовые и полугодовые колебания зонального ветра на высотах 70-110 км. - *Метеорология и гидрология*, 1982, № 10, с. 5-10.
19. Портнягин Е.И. Крупномасштабные неоднородности в поле ветра на высотах 80-100 км. - *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, 1981, т. 19, № 3, с. 236-242.
20. Портнягин Е.И., Солосалева Т.В. О регулярных вертикальных колебаниях в области мезопаузы - нижней термосферы. - *Геомагнетизм и аэронавтика*, 1982, т. 22, № 2, с. 229-232.
21. Результаты измерения ветра в верхней атмосфере над Антарктидой методом радиолокации метеорных следов/ Е.Д. Илличев, И.А. Лисенко, А.Д. Орлинский, Г.П. Петручек. - *Метеорология и гидрология*, 1970, № 12, с. 19-27.
22. Результаты изучения ветрового режима метеорной зоны радиолокационным методом/ А.В. Арефьева, В.И. Кордунов, И.А. Лисенко и др. - *Геомагнетизм и аэронавтика*, 1966, т. 5, № 4, с. 703-706.
23. Результаты исследования циркуляции атмосферы над Евразией и Арктикой методом радиолокации метеорных следов/ И.А. Лисенко, Б.Л. Медведев, М.Б. Назаренко и др. - *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, 1969, т. 5, № 9, с. 898-902.
24. Результаты координированных экспериментальных исследований ветрового режима в области мезопаузы - нижней термосферы над Шропом/И.Б.

- Портнягин, Б.В. Кальченко, В.В. Лизогоуб и др. - Результаты наблюдений в СССР метеорных следов по программе средней атмосферы. Каталог данных. М., Межведомственный геофизический комитет, 1981. - 142 с.
25. Результаты совместных измерений ветра в нижней термосфере радиолокационными и ракетным методами/ Л.А. Андреева, В.Д. Ильичев, И.А. Лысенко, А.В. Косенкова. - Труды ИЭМ, 1974, вып. I(47), с. 57-63.
26. Сравнение и интерпретация результатов одновременных измерений ветра методом радиолокации метеорных следов в Гарши (Франция) и Обнинске (СССР)/ И.А. Лысенко, Ю.И. Портнягин, Л.А. Феллус и др. - Труды Всесоюзного совещания по исследованию динамических процессов в верхней атмосфере. Обнинск. 1973. М., Гидрометеоиздат, 1976, с. 84-85.
27. Comparison and interpretation of the results of simultaneous wind measurements in the lower thermosphere at Garchy (France) and Obninsk (USSR) by meteor radar technique/M. Glass, J.L. Fellous, M. Massebeuf et al. - J. Atm. Terr. Phys., 1975, vol. 37, p. 1077-1087.
28. Elford W.G. Prevailing winds in lower thermosphere. - Nature, 1976, vol. 261, p. 123-124.
29. Elford W.G., Murray K.L. Upper atmosphere wind measurements in the Antarctic. - In: Proc. First Int. Space Sci. Symp., Nice, 1960, North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1960, p. 158-163.
30. On the nature of the several days wind oscillations in the meteor zone/ J.L. Fellous, M. Glass, M. Massebeuf et al. - J. Atm. Terr. Phys., 1976, vol. 38, p. 272-285.
31. Results of a comparison between radar meteor wind measurements and simultaneous lower ionosphere drift measurements in the same area/ I.A. Lysenko, Yu.I. Portnyagin, K. Sprenger et al. - J. Atm. Terr. Phys., 1972, vol. 34, p. 1435-1444.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Вып. 13 (102)

1983 г.

**ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОННОЙ
КОНЦЕНТРАЦИИ И ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Ю. Б. ЧАСОВАТИН

Введение

Одной из основных задач исследования околоземной космической плазмы является в настоящее время построение моделей ионосферы — эмпирических, полуэмпирических, теоретических. Эти модели необходимы для решения многих общих вопросов физики верхней атмосферы и для таких практических целей, как расчеты траекторий распространения радиоволн, расчеты линий радиосвязи и т. д. Среди различных моделей ионосферы эмпирические модели, являющиеся обобщением большого количества экспериментальных данных, занимают особое место. Они, с одной стороны, могут непосредственно использоваться в практике, а с другой — являются тем практическим критерием, по которому проверяются и корректируются другие модели ионосферы — теоретические и полуэмпирические.

Как известно, цель эмпирического моделирования состоит в том, чтобы, опираясь на глубокое понимание физических процессов и закономерностей, определяющих поведение ионосферы, путем статистического анализа и обобщения экспериментальных данных построить некоторые модельные распределения ионосферных параметров, отражающие реальную ситуацию в ионосфере при определенных гелиогеофизических условиях. Разработка эмпирических моделей ионосферных параметров ведется в настоящее время достаточно широко. За последние годы опубликован ряд таких моделей как частных, относящихся к ограниченному диапазону высот, отдельных широтным зонам и определенным геофизическим условиям, так и более полных, описывающих пространственно-временное распределение параметров ионосферы в широком интервале высот и в глобальном масштабе [3, 12, 15, 21—24, 26, 40—42]. В связи с этим значительный интерес представляет сравнение данных о распределении ионосферных параметров, даваемых различными моделями при одинаковых условиях. На основе такого сравнения можно в известной степени судить о том, как модели в целом или какие из них лучше, а какие хуже отражают ту или иную реальную ситуацию в ионосфере.

В настоящей работе кратко рассмотрены основные эмпирические модели электронной концентрации (n_e) и температуры (T_e), разработанные в последние годы [1—3, 6—11, 13—21, 28, 31, 33, 38, 40—42], проведен их сравнительный анализ, отмечены недостатки и выявлены области и условия, для которых существующие модели требуют уточнения, высказаны соображения о возможностях и путях усовершенствования глобальных эмпирических моделей n_e и T_e и сформулированы основные задачи в области разработки этих моделей. Рассмотренное ограничено областью высот 50—600 км, поскольку именно для этих высот модели ионосферы представляют в настоящее время наибольший практический интерес.

Основные эмпирические модели электронной концентрации

Сводка основных эмпирических моделей электронной концентрации, опубликованных до 1981 г., дана в табл. 1 (далее в тексте номера моделей электронной концентрации даются в соответствии с этой таблицей). Все приведенные в таблице модели относятся к спокойным геомагнитным условиям и характеризуют невозмущенную ионосферу.

Модели I и V [14, 18, 20] представляют собой первую попытку построить широтную модель спокойной ионосферы, включающую нижние шпоры и полярную область. Эти модели не являются полными, они дают профили электронной концентрации для полдня и полночи на четырех (модель I) и на шести (модель V) широтах. Модели построены на сравнительно небольшом и разнородном экспериментальном материале, являются приближенными и частными. Они далеко не полностью отражают реальную пространственную структуру полярной и экваториальной ионосферы и вариации электронной концентрации в различных геофизических условиях. Суточные изменения электронной концентрации, но только в средних широтах описывает модель IV [13, 19]. Все эти модели, охватывая большой интервал высот, не дают детального распределения электронной концентрации в области высот 80—200 км. В [3, 21] разработано аналитическое представление моделей I, IV, V, позволяющее получать глобальную картину распределения электронной концентрации в различные часы суток (для условий, которым указанные модели соответствуют, в в том приближении, которое эти модели дают).

Модель II [6—11] описывает суточные вариации электронной концентрации в средних широтах. Модельные профили n_e приведены на каждый час суток для зимы и за трехчасовые интервалы для лета. Ночные модели для высот ниже 200 км построены по небольшому числу экспериментальных данных, поэтому являются весьма приближенными и не дают детального высотного распределения электронной концентрации.

В модели III [2] приведены профили электронной концентрации для средних широт на каждый час суток с шагом по высоте 10 км. Модельные профили являются сильно сглаженными и не отражают

Таблица 1
Основные эмпирические модели электроинной концентрации

№ модели	Автор, официальное, год, дата, литература	Высота, м	Шаровая	Сила ветра, м/сек	Сезон	Время суток	Методы измерения	Степень загрязненности	Примечания
I	Соболева (ИЗМИРАН) 1971, [18]	50—1000	$\Phi=0,30, 50,75$	Низкая	Зима, лето	Полдень, ночь	ВЗ, Р, НР	В области F ~ 30% днем и ~ 50% ночью	Имеется аналитическое представление [9]
II	Блатковский и др. (ИЗМИРАН) 1976, 1975 [7—11]	50—1000	Средние	Низкая, средняя, высокая, высокая	Зима, лето	Все часы	ВЗ, ЧО, КМ, СДВ, НР, Р, Вяз	Факторы: ~ 1,5; ~ 2,5; ~ 2,5	
III	Белаянская и др. (СВОИЗМИР) 1976 [2]	50—350		Низкая, средняя	То же	Все часы	НР, Р	Средняя ~ 15% в долине ~ 30%, в долине D до 100%	Для самого меридиана: имеется аналитическое представление [3, 21]
IV	Соболева (ИЗМИРАН) 1972, 1978 [13, 18]	50—1000	$\Phi=45^{\circ}-55^{\circ}$	Низкая, высокая	Равно-денно	Все часы	ВЗ, ЧО, Р, НР, Вяз	В области F ~ 20%, в области G ~ 20% днем и ~ 50% ночью, в об- ласти D ~ 40%	Для одес- го меридиана: имеется аналитическое представление [3, 21]
V	Соболева (ИЗМИРАН) 1973, 1978 [14, 20]	50—1000	$\Phi=0,16, 30,50, 60, 80^{\circ}$	Низкая, высокая		Полдень, ночь	ВЗ, ЧО, Р, НР, Вяз		
VI	Алдриджа и др. 1978 [1]	5,5—350	Средние	Низкая, средняя, высокая	Все сезоны	Все часы	ВЗ, ЧО, КМ, П, СДВ, НР, Р		Обобщенные модели

Продолжение табл. 1

Авторы, статьи, журналы, год, литература	Нагрузка, мВ	Широта спектра	Сложность сигнала	Сезон	Время суток	Методы записи*	Степень истинности	Примечания
VII Павлов и др. 1978 (ИЭМ 1978) [10—12]	65—1000	Средняя (условно-нечеткая и блуждающая)	Любая	Все сезоны	Все часы	ВЗ, Р, НР, ВсЗ	в районе и окрестностях Ф — 15%, в максимуме области — свыше 50%	В области чистого сигнала — слабые
VIII Клименко 1978 [38]	60—3500	Низкая, средняя, высокая	*	То же	То же	ВЗ, Р, С, ВсЗ	В среднем фактор 0,5—2,0	В области чистого сигнала — слабые
IX Чистоплут Шушкова (ИЭМ) 1978, 1979, 1980 [17, 28, 33]	80—250	Средняя	Средняя	*	*	Р, НР	Несколько в области промежуточного слоя фактор ~2, выше (30—50)%, ниже — 50%; днем в области — 10%, выше ~20%	

* Здесь и в табл. 2: ВЗ — вертикальные записывающие, Р — роторные методы, НР — фотогеничные рисунки рисунками, ИЭМ — азбука азбуки, КМ — кросс-корреляция, СДВ — разностное значение корреляционных кодов, ВсЗ — внешнее зондирование, П — положение радиоволн, С — спутниковые измерения, Ф — температура в широте.

детальной структуры высотного распределения электронной концентрации в ночной ионосфере в области высот 80—200 км.

Модель VI [1] является обобщенной моделью, построенной путем анализа и осреднения ряда ранее опубликованных моделей электронной концентрации. Модельные профили n_p приведены в основном за трехчасовые интервалы. Модель является достаточно полной лишь для равноденствия при низкой активности Солнца. В остальных случаях в ней отсутствуют данные для ряда высот и часов суток.

Модель VII — это модель электронной концентрации, входящая составной частью в «Международную справочную ионосферу» (IRI-1978) — эмпирическую модель, разработанную в рамках Международного научного радиосоюза (URSI) и Комитета по исследованию космического пространства (COSPAR) специальной рабочей группой под председательством К. Равера [40—42]. Модельные профили n_p построены на основе среднеширотных и небольшого числа низкоширотных данных, поэтому модель в первую очередь предназначена для описания вариаций электронной концентрации в средних широтах. Пространственно-временные вариации электронной концентрации и других ионосферных параметров представлены в этой модели в аналитическом виде. В [42] опубликованы программы для расчета на ЭВМ параметров ионосферы, в том числе электронной концентрации, по модели IRI-1978. Модель VII (IRI-1978) является наиболее полной из числа опубликованных и последнее время, поэтому в дальнейшем при сравнении с другими моделями ей будет уделено особое внимание.

Модель VIII [38] разработана в Боннском университете. Она в аналитической форме описывает глобальное распределение электронной концентрации и ее вариации в зависимости от времени и геофизических условий. К сожалению, кроме краткого описания модели в [38], другие доступные публикации о ней отсутствуют, что делает невозможным практическое использование этой модели.

При разработке модели IX [17, 28, 33] было обращено специальное внимание на получение детального высотного распределения электронной концентрации для ночной среднеширотной ионосферы. Эта модель отражает наличие промежуточного слоя повышенной электронной концентрации в области высот 120—160 км в ночное время, что является характерной особенностью ночной ионосферы.

Из вышесказанного видно, что для одних и тех же условий в настоящее время имеется несколько различных моделей электронной концентрации. Это дает возможность сравнить такие модели между собой, что представляет, как отмечено выше, значительный интерес. Такое сравнение проведено в следующем разделе.

Сравнительный анализ основных эмпирических моделей электронной концентрации

На рис. 1 для одних и тех же или близких условий (солнечная активность, геомагнитная широта, месяц или сезон, зенитный угол

Солнца χ или местное время) представлены среднеширотные профили электронной концентрации, соответствующие различным моделям из числа приведенных в табл. 1 (на этом рисунке и на рис. 2—6 обозначения моделей даны римскими цифрами I—IX в соответствии с табл. 1, горизонтальными или вертикальными отрезками показаны пределы погрешностей моделей, согласно этой таблице, при нескольких шкалах на осях эти шкалы и соответствующие им группы профилей обозначены одинаковыми буквами; профили

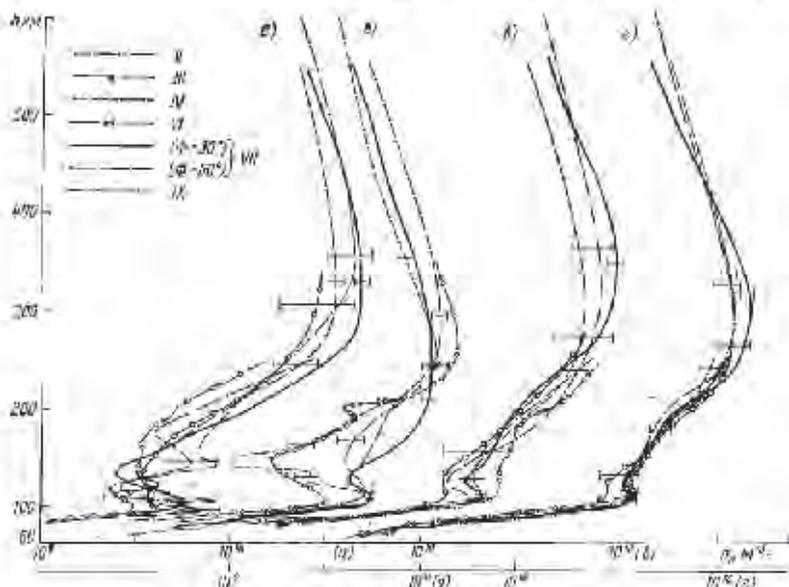


Рис. 1. Модельные профили электронной концентрации для средних широт: а — зима, 00 ч LMT, средняя и повышенная активности Солнца (модель VII при числе солнечных пятен $R=100$); б — равноденствие, 06 ч 00 мин LMT, низкая активность (модель VII при $R=20$); в — лето, 19 ч 00 мин LMT, средняя активность (модель VII при $R=80$); г — зима, 12 ч LMT, средняя и повышенная активности (модель VII при $R=100$).

n_p по модели VII рассчитывались по программе, опубликованной в [42]). Из рис. 1 видно, что в дневное время разные модельные профили n_p (группа а) в целом удовлетворительно согласуются между собой. В утренние и вечерние часы согласно модельных профилей заметно ухудшается (группы б и в). В ночное же время профили, даваемые разными моделями (группа г), существенно отличаются друг от друга, особенно в области высот 100—200 км, где наблюдаются различия не только по величине электронной концентрации, но и по характеру ее изменения с высотой. Как показано в [36], на этих высотах ночью и в сумерки существенные различия имеют

место не только между модельными профилями n_z по разным моделям, но и между модельными профилями и индивидуальными профилями из независимого массива экспериментальных данных.

Указанные различия ночью и в сумерки связаны прежде всего с сильной изменчивостью и сложной структурой профилей n_z в области высот 100—200 км в это время, что обусловлено влиянием большого числа трудно учитываемых факторов. Это приводит к большому разбросу исходных данных, затрудняющему построение модельных профилей, причем в этих условиях более сильно, чем днем, сказывается различие методов построения этих профилей. Кроме того, из-за меньшего, чем для дня, количества экспериментального материала ночные модельные профили n_z имеют большие погрешности, чем дневные. Из числа рассмотренных моделей более предпочтительной для высот 100—200 км в ночных условиях представляется модель IX, наиболее последовательно отражающая наличие промежуточного слоя повышенной электронной концентрации в области высот 120—150 км. Эта модель, лучше других согласуется с экспериментальными данными и современными представлениями о роли динамических процессов в формировании ночной ионосферы в рассматриваемой области высот.

Одной из причин отличия профилей n_z по модели IRI-1978 в области F_2 от других модельных профилей может быть то, что при расчетах профилей по этой модели использовались значения электронной концентрации в максимуме области F_2 и высоты этого максимума, вычисленные по весьма грубой модели Чжу [34] с помощью специальной подпрограммы, а не по программе МККРП, обеспечивающей более точный расчет глобального распределения параметров максимума области F_2 [42]. Действительно, если при расчетах профилей по IRI-1978 задавать параметры максимума области F_2 , взятые из моделей, с которыми проводятся сравнения, то в области F_2 (выше 200 км), как правило, имеет место лучшее согласие различных модельных профилей n_z с моделью IRI-1978. В качестве примера результаты такого сравнения для моделей II и VII (IRI-1978) приведены на рис. 2. Ниже 200 км различия между модельными профилями остаются практически прежними, что вполне естественно, так как непосредственно вытекает из структуры модели IRI-1978. Таким образом, можно считать, что в средних широтах различные модели, в том числе модель IRI-1978, в основном удовлетворительно выписывают форму профиля электронной концентрации в области F_2 (выше 200 км).

Все вышесказанное для области высот 90—200 км подтверждается и сравнением модельных профилей n_z с результатами отдельных экспериментов, проведенным в [36].

Чтобы получить более детальное представление о том, как различные эмпирические модели описывают высотное распределение электронной концентрации в среднеширотной области D , на рис. 3 для одних и тех же или близких условий приведены профили n_z по разным моделям из числа включенных в табл. 1. Там же, согласно [36], приведены профили n_z по ряду частных СДВ-моделей,

построенных по данным о распространении низкочастотных радиоволн.

Как видно из рис. 3, летом вблизи полудня на высотах более 60—65 км при низкой солнечной активности различные модельные профили n_e , в том числе и по модели IRI-1978, (группа *а*) в целом достаточно удовлетворительно согласуются между собой; в тех же условиях при высокой солнечной активности согласие модельных

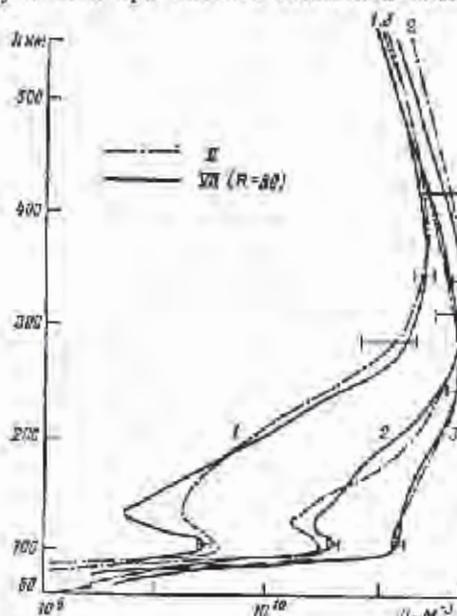


Рис. 2. Модельные профили электронной концентрации для средних широт (лето, средняя активность Солнца). Расчеты по модели VII выполнены при параметрах максимума области F по модели II;

1—00 и 00 маг LMT, 2—19 и 00 маг LMT, 3—12 и 00 маг LMT

профилей ухудшается (группа *б*), по некоторым моделям высотный ход электронной концентрации имеет резко выраженный немономонный характер, в силу чего модельные значения n_e на некоторых высотах могут различаться на порядок и более. Вблизи полудня зимой (рис. 3, группа *б*) профили n_e , соответствующие основным эмпирическим моделям, включая IRI-1978, (табл. 1), в основном удовлетворительно согласуются между собой, тогда как СДВ-модели во всем рассматриваемом интервале высот (60—100 км) дают, как правило, заниженные (в 3—10 и более раз) значения электронной концентрации в нижней части профиля, высоты участков большого градиента n_e лежат в интервале 80—90 км, но различны по разным моделям [36].

Детальное сравнение модели IRI-1978 с СДВ-моделями и оригинальными СДВ-данными, а также с массивом экспериментальных данных, полученных методами кросс-модуляции и частичных отражений, проведено в [36]. Сделан вывод, что привлечение СДВ-данных, наряду с использованием результатов измерений другими методами, будет весьма полезным при дальнейшей уточнении эмпирических моделей электронной концентрации на высотах ниже 90 км и особенно ниже 70 км. Это в основном подтверждается и

проведенным здесь сравнением с другими моделями, построенными независимо от IRI-1978 (рис. 3). В целом же построение детальной пространственно-временного распределения электронной концентрации в области *D* представляет собой специальную

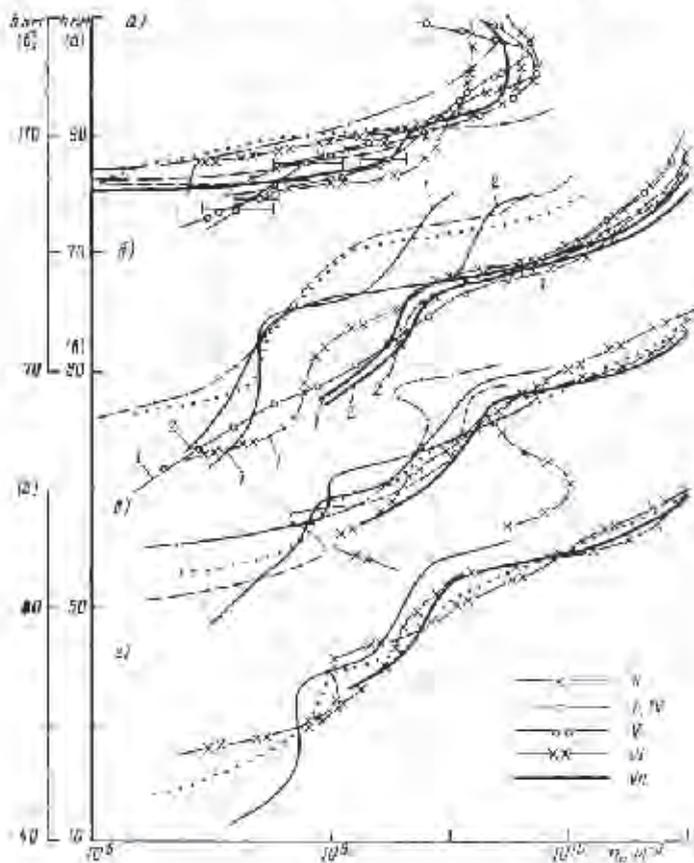


Рис. 3. Моделиные профили электронной концентрации для среднеширотной области *D*, включая четыре CДВ-модели, согласно [38] (профили, не обозначенные римскими цифрами):

a — различные сезоны, почти низкая и средняя солнечная активность; *b* — зиме, полярные (1 — низкая, 2 — высокая активность); * — лето, полярный экстремум активности; * — лето, полярный, средняя активность.

и очень сложную задачу, при решении которой должны учитываться не только традиционные геофизические, но и некоторые метеорологические факторы. Такая модель должна включать в себя в ка-

честве входных параметров, кроме геофизических факторов, также и некоторые параметры, характеризующие метеорологическую обстановку в страто-мезосфере [4, 5, 36].

В настоящее время одной из основных задач эмпирического моделирования является разработка моделей ионосферы для высоких и низких широт. Пока сделаны лишь первые шаги в этом направлении. Хотя модель IRI-1978 предназначена для описания прежде всего состояния спокойной среднеширотной ионосферы, формально

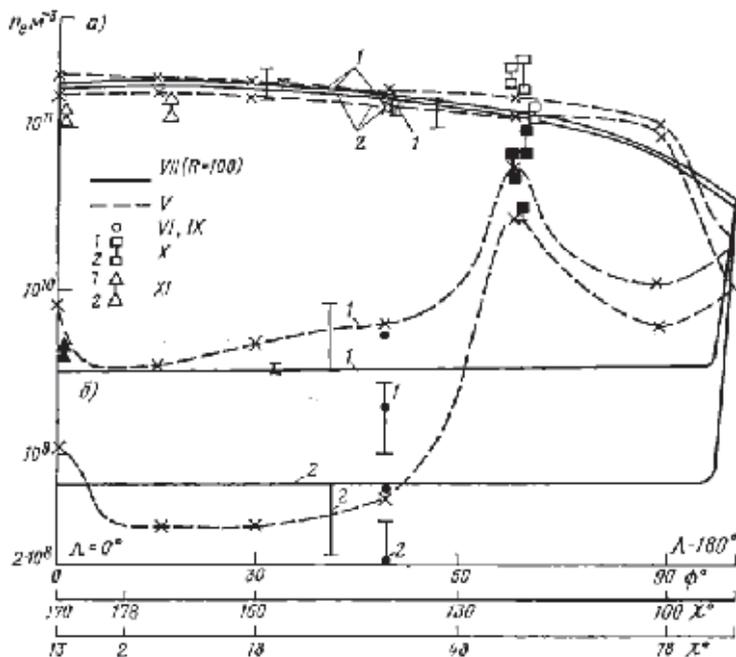


Рис. 4. Широтные вариации электронной концентрации в максимуме области E (1) и в минимуме долины (2) для равноденствия в полдень (а) и полночь (б) вдоль меридиана $\Lambda=0^\circ$ (средняя и повышенная активности Солнца):

X — экспериментальные данные для Форт-Черчильда [23]; XI — экспериментальные данные для низких широт [26]; светлые значки — полдень, темные — полночь.

она может быть продолжена в область высоких и низких широт. Рассмотрим, как эта модель описывает широтные вариации электронной концентрации, и сравним их с данными других моделей и с экспериментальными данными.

Широтные вариации электронной концентрации вдоль геомагнитного меридиана $\Lambda=0^\circ$ в максимуме области E и в минимуме межслоевой долины приведены на рис. 4. Использованы данные из

моделей *V*, *VI*, *VII* (IRI-1978) и *IX*, а также экспериментальные данные для Форт-Черчилла [29] и для низких широт [25]. Для примера рассмотрен один сезон — равноденствие, для других сезонов имеет место аналогичная картина.

Анализ результатов, представленных на рис. 4, позволяет отметить следующее. В области *E* в дневное время вплоть до геомагнитной широты $\Phi = 55-60^\circ$ наблюдается вполне удовлетворительное согласие модели IRI-1978, среднеширотных моделей *VI*, *IX* и частной модели *V*, охватывающей диапазон геомагнитных широт от 0 до 89° . Аналогичный анализ для других высот показал, что, исключая область $\pm (3-5)^\circ$ южнее геомагнитного экватора, это утверждение справедливо практически во всем интервале 90—200 км. Такое удовлетворительное согласие рассмотренных моделей позволяет считать, что в дневное время в указанном интервале высот модель IRI-1978 может использоваться на низких (от $\Phi = 3-5^\circ$) и средних широтах вплоть до $\Phi = 55-60^\circ$. Это подтверждается и экспериментальными данными, приведенными на рис. 4 [25]. В ночное время, как уже отмечалось, согласие различных моделей является плохим на всех широтах, но особенно в области аврорального овала: модель IRI-1978 не отражает характерного роста электронной концентрации в этой области, обусловленного ионизацией существующими в ней нисходящими корпускулярными потоками, тогда как модель *V* в известной степени его описывает, что подтверждается приведенными на рис. 4 экспериментальными данными [29].

Аналогичное сравнение, проведенное для области *F*, показало, что широтные вариации электронной концентрации в максимуме области *F* и высоты этого максимума по моделям *V* и *VII* (IRI-1978) согласуются лишь в самых общих чертах. Это вполне естественно при использовании в расчетах по IRI-1978 такого грубого приближения, как модель Чу [34]. Модель IRI-1978 не отражает, например, таких особенностей широтных вариаций электронной концентрации в максимуме области *F* в ночное время, как главный лонгиформный (среднеширотный) пиквал и авроральное увеличение n_e , в то же время модель *V* их в первом приближении описывает.

Профили электронной концентрации для высоких и низких широт по моделям *V* и *VII* (IRI-1978) представлены на рис. 5 и 6. Расчеты по модели *VII* выполнены при параметрах максимума области *F*, заданных по модели *V*. Как было отмечено выше, модель *V* является приближенной и далеко не полностью отражает реальную пространственную структуру полярной и экваториальной ионосферы и вариации n_e в различных гелиогеофизических условиях, однако она, хотя бы в общих чертах, описывает некоторые основные особенности широтного хода электронной концентрации и профилей n_e в различных широтных зонах. Поэтому из рис. 5 и 6 следует, что на высотах 90—200 км в высоких широтах и 90—300 км на экваторе модель IRI-1978 не дает правильного описания высотного распределения электронной концентрации, особенно в ночное время.

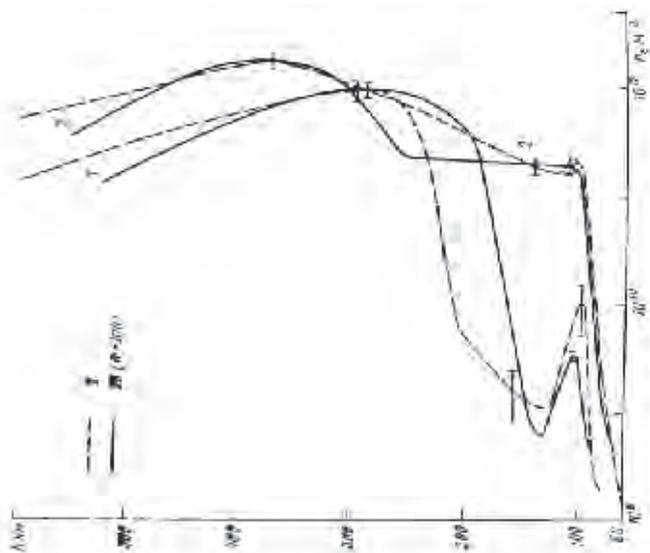


Рис. 6. Моделированные профили электронной концентрации для $\theta = 0^\circ$ (равномерное, повышенное значение Состояния). Расчеты по модели VII выполнены при параметрах максаума области F по модели V.
1 — 00 ч 00 мин ЛМТ, 2 — 12 ч 00 мин ЛМТ

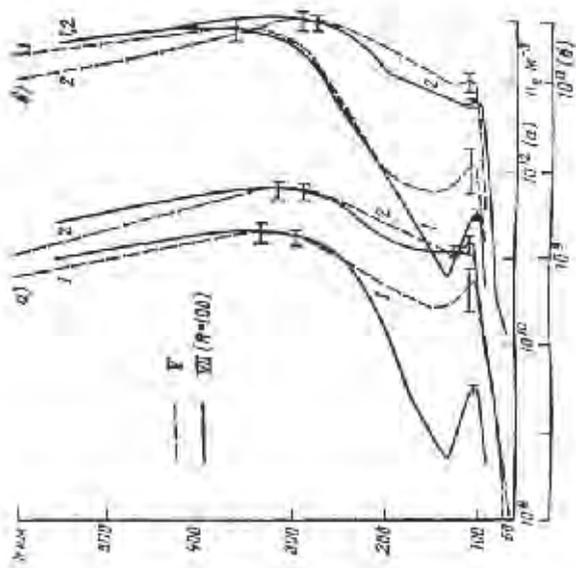


Рис. 5. Моделированные профили электронной концентрации для высшего широт (равномерное, повышенное значение активности Солнца). Расчеты по модели VII выполнены при параметрах максаума области F по модели V.
 $\theta = 65^\circ$, 1 — 00 ч 00 мин ЛМТ, 2 — 12 ч 00 мин ЛМТ

Это подтверждается и сравнением модельных профилей n_e с результатами отдельных экспериментов, проведенным в [36]. Аналогичный попрос для области D требует специального, более детального рассмотрения. Выше 200 км в высоких широтах и 300 км на экваторе обе рассматриваемые модели дают близкие по форме распределения электронной концентрации, т. е. можно считать, что в этих условиях модель IRI-1978 в первом приближении удовлетворительно описывает форму профиля n_e , хотя и требует в некоторых случаях определенной корректировки.

Таким образом, из проведенного анализа основных эмпирических моделей электронной концентрации следует, что для усовершенствования и дальнейшего развития глобальных эмпирических моделей n_e необходимо в первую очередь решить следующие вопросы:

- уточнить пространственно-временное распределение параметров максимума области F в глобальном масштабе как для спокойных, так и для возмущенных условий;
- уточнить пространственно-временные вариации и аналитическое представление высотного распределения n_e для спокойных условий (главным образом в нижней части области F и в области E в полярных и экваториальных широтах, ночью и в сумерки на этих же высотах в средних широтах, в области D) и для возмущенных условий (во всех областях ионосферы на всех широтах в различные часы суток);
- уточнить характер связи электронной концентрации с солнечной и геомагнитной активностью;
- определить метеорологические параметры, контролирующие поведение области D ионосферы, с целью учета их при разработке модели области D .

Основные эмпирические модели электронной температуры

Сводка основных эмпирических моделей электронной температуры, опубликованных до 1979 г., дана в табл. 2 (далее в тексте и на рисунках номера моделей электронной температуры даны в соответствии с этой таблицей). Все приведенные в табл. 2 модели относятся к спокойным геомагнитным условиям и характеризуют невозмущенную ионосферу.

Модели I и II [18] дают средние профили электронной температуры на четырех широтах. Модели построены на небольшом экспериментальном материале и являются весьма приближенными.

Модель III [2] построена по данным некогерентного рассеяния, полученным на среднеширотной станции Сен-Сантиаго в 1966—1968 гг. В [2] для примера в виде таблиц ежечасных значений приведена модель электронной температуры для летнего сезона при $F_{10.7} = 130—170$.

Модель IV построена по экспериментальным данным, которые получены на станциях ракетного зондирования и некогерентного рассеяния, расположенных в северном полушарии в интервале гео-

Таблица 2

Основные опытные модели экваториальной температуры

№ п/п	Авторы, год издания, год дублирования	Высота, м	Широта	Средняя влажность	Сезон	Время суток	Метод измерения	Средняя погрешность	Примечания
I	Сибиряев (ИЗМЕРАН) 1971 [18]	60—1000	$\Phi = 0, 30, 50, 75^\circ$	Шторм	Зима	Полдень, десятичасье	P, C, HP		
II	Сибиряев (ИЗМЕРАН) 1971 [18]	90—800	$\Phi = 30^\circ$	Низкая, высокая	Разно-денствие	Все часы	P, C, HP		
III	Беларуская в. до. (СИБИЗМЕР) 1976 [2]	100—400	Средние	Низкая, средняя, высокая	Все сезоны	То же	HP (Сред. Сянши, $\Phi = 47^\circ$)	(15—20) %	
IV	Чеславский, Колоска (ИЭМ) 1975, 1977 [15, 16, 31]	100—200	*	Любая	То же	*	HP, P	(10—20) %	
V	Равор и др. 1978 (ИЭМ) 1978 [10—42]	120—1000	Средние (условно низкие и высокие)	*	*	*	HP, C	в разв. в области P 15%, в об-ласти C 5%	В анализе чешского пред-ставления

магнитных широт 20—53°. Она объединяет две модели электронной температуры — по зондовым измерениям [15, 31] и по данным некогерентного рассеяния [15, 16]. Выше 140—150 км значения электронной температуры по этим двум моделям существенно отличаются друг от друга, в принципе, две данные модели в этой области высот могут быть объединены в одну. Ниже 140—150 км предложенные модели дают крайние оценки возможных предельных значений электронной температуры.

Модель V — это модель электронной температуры, входящая составной частью в уже упоминавшуюся ранее «Международную справочную ионосферу» (IRI-1978) [40—42]. Пространственно-временные вариации электронной температуры представлены в этой модели в аналитическом виде. Модельные профили T_e в диапазоне высот 200—1000 км построены путем объединения результатов спутниковых измерений электронной температуры и профилей $F_{2,3}$, полученных методом некогерентного рассеяния на станциях Милстоун Хилл, Аресибо и Джикамарка. Нижняя часть модельных профилей T_e (до 120 км) рассчитывается на основе профилей температуры нейтрального газа (T_n) из модели CIRA 1972 [35] в предположении, что разность модельных значений $T_e - T_n$, определенная на верхней граничной высоте $H_0 > 200$ км, линейно уменьшается с уменьшением высоты вплоть до 120 км, где T_e считается равной T_n . Профиль электронной температуры получается из профиля температуры нейтрального газа путем добавления к T_n значений $T_e - T_n$, определенных для соответствующих высот с помощью линейной интерполяции. Такой метод построения модельных профилей T_e ниже 200 км является существенным недостатком модели IRI-1978. Эта модель является наиболее полной из числа приведенных в табл. 2, поэтому в дальнейшем, при сравнении с другими моделями, ей будет уделено особое внимание.

Как и в случае электронной концентрации, значительный интерес представляет сравнение различных моделей электронной температуры между собой. Такое сравнение проведено в следующем разделе.

Сравнительный анализ основных эмпирических моделей электронной температуры

Как и в случае электронной концентрации, сравним сначала профили T_e для средних широт, соответствующие различным моделям.

На рис. 7 для одних и тех же или близких условий представлены среднеширотные профили электронной температуры по различным моделям, приведенным в табл. 2 (на этом рисунке и на рис. 8, 9 обозначения моделей даны римскими цифрами I—V в соответствии с табл. 2, горизонтальными или вертикальными отрезками показаны пределы горизонтальных моделей согласно этой таблице; профили T_e по модели V рассчитывались по программе, опубликованной в [42]). На основе сравнения профилей T_e , представленных на рис. 7,

1. 44660

можно отметить следующее. Как днем, так и ночью электронная температура зависит от геомагнитной широты (кривые 1, 2, 3). Ночью T_e на всех высотах растет с увеличением широты, профили электронной температуры по различным моделям удовлетворительно согласуются между собой. Днем зависимость электронной температуры от широты имеет более сложный характер. Так, по модели ИР-1978 (модель V) при изменении Φ от 30 до 50° электронная температура на больших высотах растет с широтой, а на малых высотах сначала уменьшается, а потом незначительно растет, так что

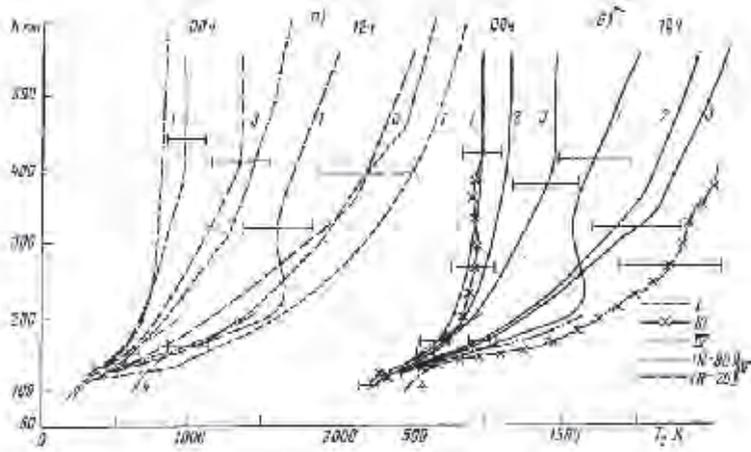


Рис. 7. Модельные профили электронной температуры для средних широт (полюдень и полночь)

a — мин. солнечная активность Солнца; б — средн. солнечная активность; 1 — $\Phi=30^\circ$, 2 — $\Phi=43^\circ$, 3 — $\Phi=50^\circ$, 4 — модели по зондовым измерениям

при $\Phi=50^\circ$ она меньше, чем при $\Phi=30^\circ$. Очевидно, это связано с немонотонным изменением T_e с высотой при $\Phi=30^\circ$. В то же время по модели I на этой широте зависимость электронной температуры от высоты монотонная и значения T_e на всех высотах больше, чем при $\Phi=50^\circ$. Профили T_e по разным моделям в дневное время согласуются между собой значительно хуже, чем ночью (в частности, из-за отмеченного различия в форме профиля). Особенно это заметно при сравнении соответствующих друг другу по геомагнитным широтам профилей по моделям I и V (группа а, кривые 1) и по моделям III и V (группа б, кривые 2, 3 и профиль по модели III).

На рис. 7 приведены также профили T_e по модели IV, которая, как уже указывалось, объединяет две модели — по зондовым ракетным измерениям и по данным некогерентного рассеяния. В соответствии с отмеченным ранее, начиная со 150 км, приведены обобщенные профили T_e , полученные путем объединения обеих моделей,

основанных на двух различных типах экспериментальных данных. По принципу построения модель IV является некоторой усредненной моделью для диапазона $\Phi = 20-50^\circ$. Как видно из рис. 7, профили электронной температуры по этой модели (ниже 150 км рассматриваются только профили, соответствующие модели по данным некогерентного рассеяния) удовлетворительно согласуются с другими профилями, кроме профилей по моделям I и V для зимы при $\Phi = 30^\circ$ в ночное время и профилей по модели V при $\Phi = 40-50^\circ$ днем, причем модель V днем на указанных широтах дает значения T_e более низкие, чем по другим моделям. Аналогичные результаты были получены и в [32], где на основе более детального сравнения различных моделей электронной температуры в области высот 100—200 км показано, что модель IRI-1978 (модель V) при $\Phi = 40-50^\circ$ дает заниженные (по сравнению с другими моделями) значения T_e в дневное время, особенно летом. Там же отмечено, что по модели IRI-1978 изменения электронной температуры при переходе от зимы к лету очень малы как ночью, так и днем. Для дня это не согласуется с данными других моделей.

Так же как и для электронной концентрации, рассмотрим теперь широтные вариации электронной температуры во всем диапазоне широт (вдоль геомагнитного меридиана $\Lambda = 0^\circ$) по разным моделям и по отдельным экспериментальным данным. Эти вариации на высотах 160, 200 и 300 км представлены на рис. 8. Были использованы данные из моделей I, III, IV, V и из частных моделей [16, 27, 31], а также экспериментальные данные для Форт-Черчилла [27], Чаттануга [46], Аресибо [30, 43—45], Джикамарки [37, 39] и из [32] (низкие широты). Для примера рассмотрены два сезона — зима и равноденствие, для лета имеет место аналогичная картина.

При обсуждении результатов, приведенных на рис. 8, прежде всего следует отметить резкое изменение электронной температуры на высотах 160 и 200 км в полдень при $\Phi = 40^\circ$ по модели V (IRI-1978). Это связано с тем, что на этой широте в дневное время в модели V скачком изменяется значение параметра N_d , определяющего границу перехода от одних расчетных формул (для верхней части ионосферы) к другим (для нижней части ионосферы). Этот параметр равен 200 км при $\Phi < 40^\circ$ и 350 км при $\Phi > 40^\circ$ [42]. Как видно из рис. 8, значения T_e по модели III и частным моделям из [16, 31] (точки 1—5) для ряда станций, расположенных в диапазоне геомагнитных широт 20—53°, не имеют «скачка» при $\Phi = 40^\circ$ и в диапазоне геомагнитных широт 40—50° лежат заметно выше значений по модели V (точки соответствуют станциям: 1 — Каоэма, 2 — Аресибо, 3 — Сен-Сантин, 5 — Милстоун Хилл [16, 31]; 4 — Сен-Сантин [2]). Таким образом, расчет электронной температуры по модели V на высотах вблизи 200 км в дневное время при $\Phi = 40-50^\circ$ является некорректным, модель не дает правильного широтного хода в этом диапазоне широт, в силу чего модельные значения T_e оказываются заниженными. Наличием «скачка» электронной температуры по модели V при $\Phi = 40^\circ$ объясняются отмеченные в [32] для этой модели необычно малые изменения T_e при переходе от

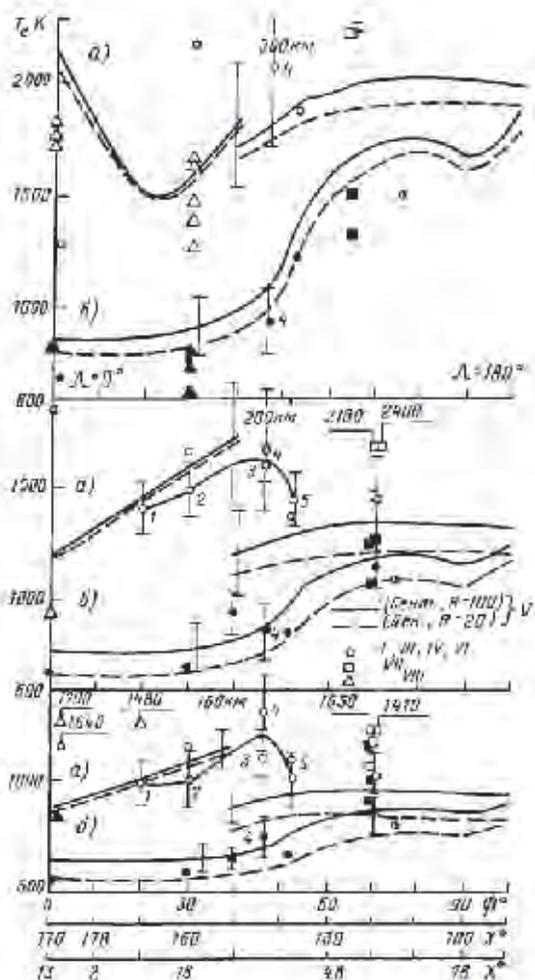


Рис. 8. Широтные вариации электронной температуры на фиксированных высотах для зимы и равноденствия и полдень (а) и полночь (б) вдоль меридиана $\lambda = 0^\circ$ (низкая, средняя и повышенная активность Солнца):

1) — данные по частоте модели для высоких широт [27];
 VI — экспериментальные данные для высоких широт (160, 200 км — Фэрри-Коррал [27], 300 км — Чателена [16]); VII — экспериментальные данные для низких и средних широт (100 км — из [32], 200, 300 км — Джикамарка [27, 33], Аресубо [30, 43–45]); точки 1–5 соответствуют различным станциям; раскраска значки — полдень, темные — полночь

вояки ко дню при $\Phi = 40-50^\circ$, а также существенные отличия от других моделей T_e в этом диапазоне широт.

Как видно из рис. 8, на высотах 160 и 200 км в полдень на низких широтах значения T_e по модели *I*, так же как и по отдельным экспериментам (точки *VIII*), существенно выше соответствующих значений по модели *V*; в полдень на высоких широтах электронная температура по частной модели [27] (точки *VI*) и по отдельным экспериментам в Форт-Черчилле (точки *VII*) выше, а по модели *I* ниже значений T_e по модели *V*.

Широтные вариации электронной температуры по модели *V* на высоте 300 км в дневное время в области низких широт имеют другой характер, чем на меньших высотах. Это связано с тем, что на низких широтах высотное распределение электронной температуры становится немонотонным и имеет характерный максимум в области высот 200—300 км. Наличие максимума затрудняет построение модельных профилей на этих широтах и приводит к тому, что в дневное время в указанной области высот и вблизи нее имеют место существенные различия между значениями T_e по разным моделям, а также между модельными значениями T_e и отдельными экспериментальными данными (рис. 8, кривые *V*, точки *I*, *VIII*). Аналогичные различия вблизи 300 км и выше в дневное время имеют место и на высоких широтах (рис. 8, кривые *V*, точки *I*, *VII*).

Как видно из рис. 8, в ночное время в целом имеет место лучшее, чем днем, согласие значений электронной температуры по разным моделям и с экспериментальными данными практически во всем диапазоне широт, хотя в ряде случаев, особенно на низких и высоких широтах, экспериментальные значения T_e могут заметно отличаться от модельных. Аналогичные результаты были получены и при детальном сравнении модели IRI-1978 (модель *V*) с экспериментальными данными [32]. В ночное время широтный ход T_e значателен на всех рассматриваемых высотах и характеризуется возрастанием электронной температуры при переходе от средних широт к высоким, причем это возрастание усиливается с увеличением высоты (рис. 7, 8).

Все вышесказанное относительно низких и высоких широт наглядно подтверждается профилями T_e для $\Phi = 0^\circ$ и $\Phi = 75^\circ$ по моделям *I* и *V*, приведенными на рис. 9.

Таким образом, из приведенного анализа основных эмпирических моделей электронной температуры непосредственно вытекает, что для усовершенствования и дальнейшего развития глобальных эмпирических моделей T_e в первую очередь необходимо:

для спокойных и возмущенных условий уточнить широтный ход электронной температуры во всем диапазоне широт, особенно в дневное время;

уточнить характер высотного распределения T_e ниже 200 км как для спокойных, так и для возмущенных условий;

уточнить характер высотного распределения T_e в дневное время на низких широтах, определив широту и геофизические условия,

при которых происходит переход от монотонного изменения T_e с высотой к немонотонному;

дополнительно исследовать факторы, вызывающие значительный разброс результатов измерений электронной температуры вблизи полудня, с целью учета этих факторов при разработке моделей;

уточнить характер связи электронной температуры с солнечной и геомагнитной активностью, а также сезонные особенности электронной температуры;

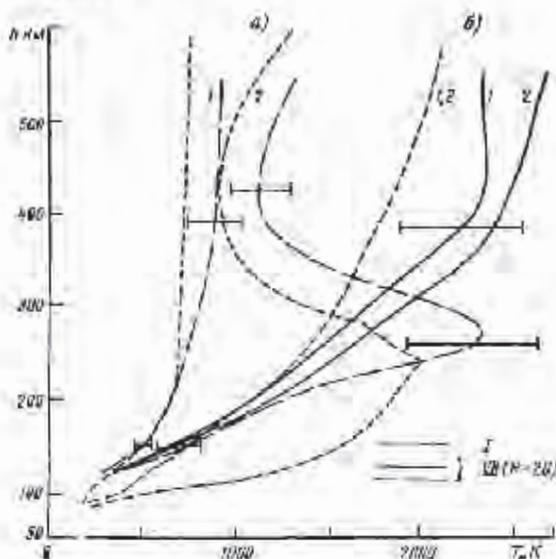


Рис. 9. Модельные профили электронной температуры для низких и высоких широт (анма, низкая активность Солнца);

а — $\Phi=0^\circ$, б — $\Phi=75^\circ$; 1—01 и 02 — данные LMT, 3—4 — по модели LMT.

на большом экспериментальном материале. Уточнить характер пространственно-временного распределения электронной температуры в полярных и экваториальной областях в различных гелиогеофизических условиях, а для полярных условий — и на средних широтах.

Заключение

Анализ и сравнение основных эмпирических моделей электронной концентрации и электронной температуры, опубликованных до 1979 г. (T_e) и 1981 г. (n_e), включая «Международную справочную ионосферу» (IRI-1978), позволили установить, как эти модели в целом или какие из них лучше, а какие хуже описывают ту или

нную ситуацию в ионосфере, выявить недостатки моделей, а также области и условия, для которых существующие модели требуют уточнения.

Все рассмотренные модели электронной концентрации и температуры относятся к спокойным геомагнитным условиям и характеризуют невозмущенную ионосферу.

На средних широтах в областях E и F ионосферы в дневное время разные модельные профили n_e в целом удовлетворительно согласуются между собой; в ночное время они существенно отличаются друг от друга, особенно в области высот 100—200 км, где наблюдаются различия не только по величине электронной концентрации, но и по характеру ее изменения с высотой. Из числа рассмотренных моделей электронной концентрации более предпочтительной для высот 100—200 км в ночных условиях представляется модель [28, 33], наиболее последовательно отражающая наличие промежуточного слоя повышенной электронной концентрации в области высот 120—160 км. Форма профиля электронной концентрации в области F (выше 200 км) в основном удовлетворительно описывается рассмотренными моделями, в том числе моделью IRI-1978. В области D лишь летом в дневное время на высотах более 80—65 км при низкой солнечной активности различные модельные профили n_e в целом достаточно удовлетворительно согласуются между собой, в остальных случаях согласие значительно хуже.

Из рассмотренных моделей электронной концентрации лишь модели [14, 20] и [18], хотя бы в общих чертах, описывают некоторое основные особенности широтного хода электронной концентрации и профилей n_e в высоких и низких широтах. Однако эти модели являются приближенными и частными, они далеко не полностью отражают реальную пространственную структуру полярной и экваториальной ионосферы и вариации электронной концентрации в различных геофизических условиях, особенно ниже 200 км в ночное время в полярных областях.

На средних широтах ночью разные модельные профили электронной температуры удовлетворительно согласуются между собой, в дневное время согласие значительно хуже, в частности, из-за различия в форме профилей T_e по разным моделям вблизи геомагнитной широты 30°. На высотах вблизи 200 км в дневное время модель IRI-1978 не дает правильного широтного хода электронной температуры в диапазоне геомагнитных широт 40—50°. Это приводит к заниженным значениям T_e и к необычно малым изменениям T_e при переходе от ночи к дню в указанном диапазоне широт по сравнению с другими моделями.

На низких и высоких широтах в дневное время имеют место существенные различия между значениями T_e по разным моделям, а также между модельными значениями T_e и отдельными экспериментальными данными. На низких широтах в области высот 200—300 км и вблизи нее это связано с наличием максимума электронной температуры в указанной области высот. В ночное время в целом имеет место лучшее, чем днем, согласие значений электронной тем-

пературы по разным моделям и с экспериментальными данными, хотя в ряде случаев, могут существовать и заметные различия.

На основе проведенного анализа можно следующим образом определить главные направления усовершенствования и дальнейшего развития глобальных эмпирических моделей электронной концентрации и температуры и сформулировать основные задачи в области разработки этих моделей:

получение, накопление и анализ новых экспериментальных данных для различных гелиогеофизических условий, включая возмущенные, в первую очередь для полярных и экваториальной областей;

исследование зависимости электронной концентрации и температуры от солнечной активности, а также от геомагнитной активности, включая выбор индексов, наиболее полно отражающих эти зависимости;

выбор метеорологических параметров, контролирующих поведение области D ионосферы, с целью включения их в число входных параметров модели области D ;

уточнение пространственно-временных вариаций, характера и аналитического представления высотных распределений электронной концентрации и температуры для спокойных (в первую очередь в полярных и экваториальных широтах, в области D — для электронной концентрации) и возмущенных условий (в глобальном масштабе);

уточнение пространственно-временного распределения параметров максимума области F в глобальном масштабе как для спокойных, так и для возмущенных условий;

уточнение широтного хода электронной температуры во всем диапазоне широт для спокойных и возмущенных условий, определение широты и геофизических условий, при которых в дневное время происходит переход от монотонного изменения T_e с высотой к немонотонному;

дополнение эмпирических моделей полуэмпирическими в первую очередь в полярных областях, особенно для тех районов, где недостаточно экспериментальных данных; из-за сильной изменчивости параметров полярной ионосферы и сложности теории только на пути разумного сочетания эмпирического и полуэмпирического моделирования могут быть в ближайшее время достигнуты ощутимые успехи в создании достаточно полной модели полярной ионосферы, а следовательно, и глобальной модели ионосферы;

разработка на эмпирической основе моделей, включающих возмущенные условия; этому должен предшествовать выбор индекса или системы индексов, характеризующих ионосферную возмущенность; такие модели могут быть уже использованы и для решения задач ионосферного прогнозирования.

В заключение автор приносит благодарность С. Е. Ивановой за проведение на ЭВМ расчетов параметров ионосферы по модели IRI-1978 и Н. И. Селезневой за помощь в оформлении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев В. А., Бурдак Л. Ф., Ковалев С. И. Обобщенные эмпирические модели высотного распределения электронной концентрации в спокойной ионосфере на средних широтах. — Космические исследования, 1978, т. 16, № 5, с. 705—714.
2. Белинская С. И., Вишняков А. В., Кошкин В. В. Распределение концентраций и температур электронов и ионов на высотах E и F-областей ионосферы по данным прямых измерений. — Препринт № 7—76, Иркутск, Сиб-ИЗМИР АН СССР, 1976. — 27 с.
3. Гуревич А. В., Фишук Д. И., Цедякина Е. Е. Трехмерная аналитическая модель распределения электронной концентрации спокойной ионосферы. — Геомагнетизм и аэронавтика, 1973, т. 13, № 1, с. 31—40.
4. Давидов А. Д., Ледомская С. Ю. Зимний аномалия области D — аэрономический и метеорологический аспекты. — Геомагнетизм и аэронавтика, 1979, т. 19, № 6, с. 961—980.
5. Давидов А. Д., Ледомская С. Ю. Построение эмпирической модели области D. I. Основные принципы и банк данных (сез. постоянный сборник).
6. Зеленова Т. И., Эмпирические модели высотно-суточных вариаций электронной концентрации в среднеширотной ионосфере в условиях летнего сезона. — В кн.: Эмпирические модели. М., Наука, 1978, с. 10—27.
7. Зеленова Т. И., Легенька А. Д., Фаткуллин М. И. Эмпирическая модель высотно-суточных вариаций электронной концентрации в среднеширотной ионосфере на высотах 60—1000 км в условиях зимнего сезона периода низкой активности Солнца. — В кн.: Физика и моделирование ионосферы. М., Наука, 1976, с. 7—57.
8. Зеленова Т. И., Легенька А. Д., Фаткуллин М. И. Эмпирическая модель распределения электронной концентрации в среднеширотной ионосфере в летний сезон периода высокой активности Солнца. — В кн.: Физика и эмпирическое моделирование ионосферы. М., Наука, 1976, с. 6—39.
9. Зеленова Т. И., Легенька А. Д., Фаткуллин М. И. Модель высотно-суточных вариаций электронной концентрации в среднеширотной ионосфере в летний сезон при средней активности Солнца. — В кн.: Физика и эмпирическое моделирование ионосферы. М., Наука, 1976, с. 40—71.
10. Зеленова Т. И., Легенька А. Д., Фаткуллин М. И. Модельные распределения электронной концентрации в среднеширотной ионосфере в условиях зимнего сезона при средней и высокой активности Солнца. — В кн.: Физика и эмпирическое моделирование ионосферы. М., Наука, 1976, с. 71—103.
11. Зеленова Т. И., Легенька А. Д., Фаткуллин М. И. Эмпирическая модель распределения электронной концентрации в среднеширотной ионосфере в летний сезон периода низкой активности Солнца. — В кн.: Физика и структура экваториальной ионосферы. М., Наука, 1981, с. 137—152.
12. Ионосферные модели. — Сборник статей под ред. М. И. Фаткуллина. М., Наука, 1975. — 180 с.
13. Кадухин Г. Ф., Соболева Т. Н. Эмпирическая модель высотно-суточных вариаций электронной концентрации в среднеширотной ионосфере на высотах 50—900 км в равноденственных условиях высокой солнечной активности. — В кн.: Распространение радиоволн в ионосфере. М., ИЗМИРАН, 1978, с. 137—142.
14. Кадухин Г. Ф., Соболева Т. Н. Широтные вариации электронной концентрации для расчетов распространения радиоволн. — В кн.: Распространение дециметровых радиоволн. М., ИЗМИРАН, 1978, с. 140—149.
15. Козлова Н. М. Исследования температуры электронного газа в тепловом балансе ионосферы на высотах 100—200 км. — Автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. физ.-мат. наук. — Омск, 1977. — 23 с.
16. Козлова Н. М. Вариации электронной температуры на высотах 110—200 км по данным высотного рассеяния. — Труды ИЭМ, 1978, вып. 6(74), с. 74—82.
17. Корякина Е. А., Шушкова В. В. Широтный эффект в распределении электронной концентрации. — Труды ИЭМ, 1979, вып. 9(85), с. 49—56.

18. Соболева Т. Н. Глобальная модель интегральной поперечной проводимости ионосферы. — Дл. ВНИИТИ № 3504—71, М., 1971. — 41 с.
19. Соболева Т. Н. Модельные профили суточного распределения электронной концентрации спокойной ионосферы на средних широтах. — Препринт № 20, М., ИЗМИРАН, 1972. — 38 с.
20. Соболева Т. Н. Широтная модель распределения электронной концентрации спокойной ионосферы. — Препринт № 16, М., ИЗМИРАН, 1972. — 40 с.
21. Тушевцова И. А., Фишук Д. И. Уточнение широтного хода коэффициентов равнодействующей аналитической модели трехмерного распределения электронной концентрации ионосферы. — В кн.: Исследования сверхдальнего распространения коротких радиоволн, М., ИЗМИРАН, 1975, с. 143—150.
22. Фаткуллина М. Н. Модели ионосферы. — В кн.: Итоги науки и техники. Геоматематика и высокие слои атмосферы, М., ВНИИТИ АН СССР 1975, т. 2, с. 102—169.
23. Физика и моделирование ионосферы. — Сборник статей под ред. М. Н. Фаткуллиной и М. Г. Демидова, М., Наука, 1975. — 339 с.
24. Физика и эмпирическое моделирование ионосферы. — Сборник статей под ред. М. Н. Фаткуллиной и М. Г. Демидова, М., Наука, 1976. — 268 с.
25. Хлюпки В. Г., Часовитин Ю. К. Ракетные измерения электронной концентрации в экваториальной области. — Труды ИЭМ, 1979, вып. 5(62), с. 30—33.
26. Часовитин Ю. К. Эмпирические модели ионосферы. — Тезисы доклада на V Всесоюзном семинаре по моделированию ионосферы, Тбилиси, 1980, с. 2—3.
27. Часовитин Ю. К., Ключева Н. М. Ракетные измерения электронной температуры полярной области на высотах 100—200 км. — В кн.: Полярная ионосфера и магнитосферно-ионосферные связи, Алматы, Колесный филиал АН СССР, 1974, с. 142—160.
28. Часовитин Ю. К., Шушкова В. Б. Эмпирическая модель вертикальной структуры верхней среднелатитудной ионосферы. — Геоматематика и аэронавтика, 1980, т. 20, № 1, с. 25—28.
29. Часовитин Ю. К., Шушкова В. Б. Электронная концентрация в арктической и субарктической областях по данным ракетных измерений. — В кн.: Ионосферные исследования, 1983, вып. 35, с. 21—36.
30. Blake L. H., Carlson H. C., Mahajan. Radar backscatter and rocket probe measurements of electron temperature above Arecibo. — J. Geophys. Res., 1969, vol. 74, N 7, p. 1883—1891.
31. Chasovitin Yu. K., Klyucheva N. M. Electron temperature variation at 100—200 km from probe measurements. — Space Res., 1975, vol. 15, p. 309—377.
32. Chasovitin Yu. K., Klyucheva N. M. Verification of the international reference ionosphere on electron temperature profiles obtained by various methods below 200 km. — Paper to be Presented at the XXIII COSPAR Plenary Meeting, Budapest, June 1980. — 25 p.
33. Chasovitin Yu. K., Shushkova V. B. Mid-latitude night time empiric model of electron density for the 80—180 km height region. — The Report Presented at International Symposium on Solar—Terrestrial Physics, Innsbruck, Austria, May—June 1978. — 17 p.
34. Chiu Y. T. An improved phenomenological model of ionospheric density. — J. Atm. Terr. Phys., 1975, vol. 37, p. 1563—1570.
35. ITRA-1972. COSPAR (International) Reference Atmosphere 1972. — Berlin: Akademie—Verlag, 1972. — 450 p.
36. Comparison of IRI with [e]-profiles obtained below 200 km by different methods/Yu. K. Chasovitin, A. D. Danilov, S. M. Demykin et al. — Paper to be Presented at the XXIII COSPAR Plenary Meeting, Budapest, June 1980. — 34 p.
37. Farley D. T. Ionospheric temperature and composition measurements at the magnetic equator. — Ann. Geophys., 1966, vol. 22, p. 448—459.
38. Kohlstein W. Electron Density Models of the Ionosphere. — Rev. Geophys. Space Phys., 1978, vol. 16, N 3, p. 341—354.
39. McClure J. P. Equatorial ion temperature: a comparison of conflicting incoherent scatter and Ogo 4 retarding potential analyzer values. — J. Geophys. Res., 1971, vol. 76, N 19, p. 4534—4540.

40. Rower K. Mid- and high latitude reference ionosphere. In: *Dynamical and Chemical Coupling between the Neutral and Ionized Atmosphere*. Dordrecht, Holland, 1977, p. 129—143.
41. Rower K., Billetza D., Ramakrishnan S. Goals and status of the International Reference Ionosphere. — *Rev. Geoph. Space Phys.*, 1978, vol. 16, N 2, p. 177—181.
42. Rower K., Ramakrishnan S., Billetza D. International Reference Ionosphere 1978. — International Union of Radio Science (URSI), Brussels, Belgium, 1978 — 73 p.
43. Rosa A. V. The theoretical time-dependent thermal behavior of the ionospheric electron gas. — *J. Geoph. Res.*, 1968, vol. 71, N 17, p. 4107—4112.
44. Schunk R. W., Nagy A. F. Electron temperatures in the F-region of the ionosphere: theory and observations. — *Rev. Geoph. Space Phys.*, 1978, vol. 16, N 3, p. 355—399.
45. Wand R. H., Perkins F. W. Temperature and composition of the ionosphere diurnal variations and waves. — *J. Atm. Terr. Phys.*, 1970, vol. 32, N 12, p. 1921—1943.
46. Watt T. M. Incoherent scatter observations of the ionosphere over Chatanika, Alaska. — *J. Geoph. Res.*, 1973, vol. 78, N 16, p. 2992—2998.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

1974 г. Вып. 5 (43)

**ОПТИЧЕСКАЯ МНОГОХОДОВАЯ КЮВЕТА С БАЗОЙ
50 м ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ
ГАЗОВ**

*В. Н. АРЕФЬЕВ, Н. В. БОРОВСКИЙ, О. А. ВОЛКОВИЦКИЯ,
Н. В. ГОНЧАРОВ, В. И. ДИАНОВ-КЛОКОВ, Н. И. СИЗОВ*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно возрос интерес к исследованиям прохождения излучения оптического диапазона в атмосфере Земли и других планет. Интерпретация измерений в реальной атмосфере в большинстве случаев сопряжена с необходимостью одновременного учета многих метеорологических параметров, часть которых недостаточно точно определена. В этой связи возникает потребность в проведении модельных лабораторных опытов, в ходе которых возможно создание протяженных слоев искусственных атмосфер со строго контролируруемыми параметрами. Применяемые в таких исследованиях оптические кюветы можно разделить на одноходовые, в которых излучение проходит через исследуемый слой газов один раз, и многоходовые, в которых излучение проходит через один и тот же слой несколько раз.

Одноходовые кюветы представляют собой трубу с двумя торцевыми окошками из материала, прозрачного для исследуемого излучения, и устройством для ввода необходимых газов. Наиболее длинные одноходовые кюветы созданы в США (24 и 36 м) [1, 2], Франции (106 м) [3] и СССР (96,7 м) [4, 5]. Для работы с химически активными газами использовались стеклянная кювета длиной 47 м [6]. Хотя во многих случаях необходимы более длинные оптические трассы, дальнейшее увеличение геометрических размеров кювет нецелесообразно из-за громоздкости конструкции и неэффективного использования рабочего объема.

Многоходовые кюветы позволяют использовать рабочий объем более эффективно за счет многократного прохождения излучения через один и тот же слой газа. Благодаря различным комбинациям линз, призм, зеркал, размещенных внутри корпуса кюветы, возможно создание двух-, трех-, четырех- и многоходовых кювет [7—12].

В 1942 г. Дж. Уайт [13] предложил оригинальную схему с тремя зеркалами, которая дает возможность получить любое число ходов, кратное четырем. В настоящее время такая схема получила широкое применение в кюветках, предназначенных для различных исследований прохождения через жидкости и газы [14—35]. На табл. 1, где приведены характеристики описанных в литературе

Таблица 1

Характеристики многоходовых кювет

Базовая длина оптического пути, м	Диаметр кюветки, мм	Максимальная длина оптического пути, м	Максимальное давление, атм	Пределы изменения температуры, °С	Литературный источник
44	250	3168	2	20	[14]
32	250	1500	1	20	[15]
44	500	5000	5	20	[24]
12,5	125	1000	1	20	[25]
29	910	1000	2,5	20—70	[26]
15	600	980	1	23—25	[28]
15,5	650	500	1	20—40	[29]
11	635	2540	1	—150+20	[31]
2,5	360	180	1	80	[32, 34]
5	1000	1000	1	20—90	[35]

ре наиболее крупных многоходовых кювет, построенных по принципу Уайта, видно, что их базовая длина может достигать 44 м. В последнее время в Главной геофизической обсерватории им Воейкова создана открытая многоходовая установка с базой 100 м для измерений спектральной прозрачности атмосферы в природных условиях [37].

В данной статье приводится описание многоходовой кюветы с базой 50 м, предназначенной для измерений спектров пропускания искусственных атмосфер. Она создана по схеме Уайта на основе установки для оптических исследований ИЭМ [38].

Оптическая схема кюветы

Оптическая схема кюветы вместе с одним из вариантов осветителя и приемника приведена на рис. 1.

Кювета состоит из вогнутых зеркал A_1 , A_2 и B , имеющих один и тот же радиус кривизны ($R=49725$ мм). Зеркало B расположено на двойном фокусном расстоянии от зеркал A_1 и A_2 так, что его центр кривизны находится в точке C между зеркалами A_1 и A_2 . Таким образом, зеркало B переносит изображение зрачка A_1 на A_2 . Зеркало A_1 , центр кривизны которого находится в геометрическом центре зеркала B (точка C_1), создает на последнем изображение (а) входной щели. В свою очередь, зеркало A_2 , центр которого находится в точке C_2 на поверхности B , передает изображение (а) на выходную щель изображение (б). В этом случае излучение

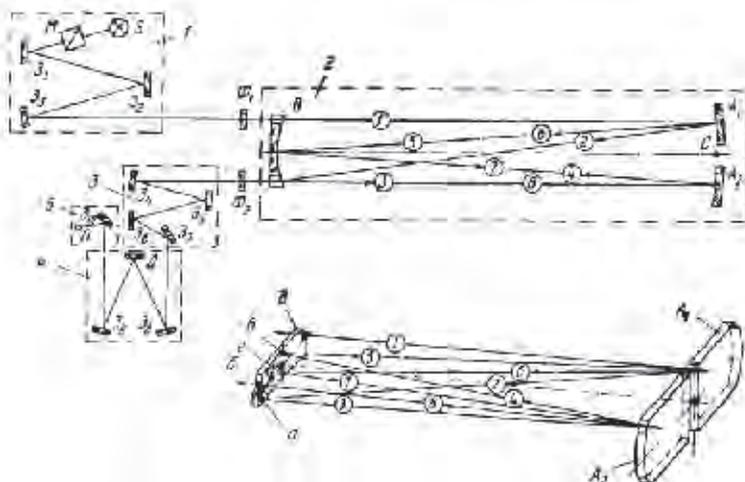


Рис. 1. Оптическая схема многоходовой кюветы с осветителем и спектрометром.

1 — осветитель, 2 — кювета, 3 — блок согласования кюветы с микрокомпаратором, 4 — микрокомпаратор, 5 — блок преломляющих. Цифрами в кругиках показан ход лучей в кювете после восьми ходов, буквы на зеркалах — соответствующие изображения входной щели.

проходит в кювете четыре раза. Если поворотом зеркала A_2 вокруг вертикальной оси сместить его центр кривизны в точку C_2 , расположенную на расстоянии $1/2l$ от точки C_1 (l — расстояние между C_1 и C_2) при четырех ходах, то излучение пройдет в кювете восемь раз. Действительно, зеркало A_2 создает на B изображение (a), а зеркало A_1 — изображение ($б$), и снова зеркало A_1 создает изображение ($в$) на выходной щели. Теперь при новых положениях центра кривизны зеркала A_2 по отношению к центру кривизны зеркала A_1 , равных $1/3l$, $1/4l$, $1/5l$ и т. д., в кювете обеспечивается соответственно 12, 14, 20 и т. д. ходов. Кроме описанного выше варианта изменения числа ходов, возможны и другие, например, поворотом зеркала A_1 при неподвижном A_2 или одновременным поворотом A_1 и A_2 .

Предел числа проходов определяется относительными размерами зеркала B и щели, а также интенсивностью источника и чувствительностью приемника излучения. Максимальное число ходов при выбранных габаритах входной щели и зеркала B составляет 68, т. е. трасса, достижимая в кювете, равна приблизительно 3,4 км. Предусмотрена возможность увеличения длины трассы за счет уменьшения размеров щели.

Осветитель представляет собой согласованный с кюветой источник излучения, в качестве которого для опытных кювет использована лампа накаливания КГМ-6, 6-200. Сферические зеркала Z_1 и Z_2 создают на входной щели увеличенное в семь раз

изображение источника S . Плоское зеркало Z_2 введено по конструктивным соображениям. Излучение источника моделируется металлическим обтюратором M , с которым жестко связан генератор широчных напряжений для синхронного детектора регистрирующего устройства.

Спектрометр, с которым испытывалась кювета, включает в себя монохроматор, собранный по горизонтально-симметричной схеме Эберта—Фаста на параболических зеркалах Z_1 и Z_2 . Диспергирующим элементом служит дифракционная решетка D размером 140×150 мм с числом штрихов 600 на 1 мм. Зеркала Z_1 и Z_2 создают изображение выходной щели кюветы на входной щели монохроматора, одновременно согласуя апертурные углы. Плоские зеркала Z_5 и Z_7 введены по конструктивным соображениям.

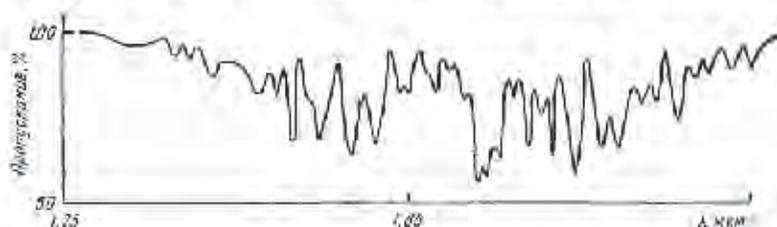


Рис. 2. Полюс поглощения водяного пара 1,87 мкм.

Зеркало Z_{10} передает изображение выходной щели монохроматора на приемник излучения $П$, в качестве которого используется фотоспротивление на основе PbS .

Электрический сигнал с приемника поступает на вход усилителя и далее на синхронный детектор. Сигнал с детектора записывается на бумажной диаграмме самописца КСП-4 и одновременно с помощью специального устройства регистрируется на перфоленде для последующей обработки на ЭВМ.

Спектр поглощения атмосферного воздуха в области 1,87 мкм, полученный в кювете на трассе 2,8 км при абсолютной влажности около $0,5$ г/м³, представлен на рис. 2.

Конструкция кюветы

Упрощенная схема конструкции кюветы показана на рис. 3. Корпусом кюветы 1 является 50-метровая труба диаметром 700 мм, выполненная из листовой нержавеющей стали толщиной 6 мм, заключенная в другую трубу 2 диаметром 800 мм и закрытая толстостенными крышками 3. В пространстве между трубами 4 по спиралевидным каналам циркулирует вода для нагрева или охлаждения кюветы. Снаружи имеется слой термо- и гидроизоляции. Для предотвращения поперечной температурной деформации концы кюветы, жестко закрепленной в центральной части 5, опираются на подвижные опоры 6. Терми кюветы, находящейся в

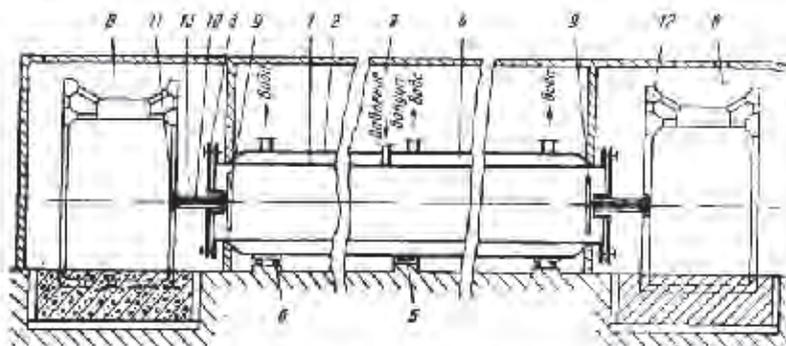


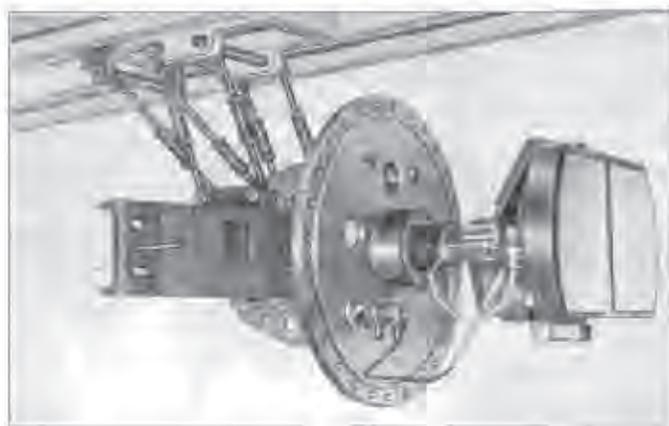
Рис. 3. Схема конструкции камеры

подземном железобетонном тоннеле 7, выходят в рабочие помещения 8.

Чтобы избежать влияния деформаций корпуса камеры, вызываемых изменениями режимов и вибрациями здания, на расположенные внутри камеры зеркала A , A_2 и B , последние вместе с системами их дистанционной юстировки 9 удержаны на массивных телескопических штангах 10. Штанги проходят через центральные отверстия крышек 3 и жестко прикреплены к мощным чугунным траверсам 11, привинченным болтами к стенам рамных конструкций 12, нижние части которых залиты в бетонные фундаменты, развязанные с фундаментом здания. Для сохранения герметичности камеры штанги соединены с крышками сильфонами 13.

Телескопические штанги позволяют перемещать зеркала вдоль оптической оси на ± 100 мм специальным ключом через отверстия в траверсах, в рабочем состоянии закрытые герметично крышками.

Каждое зеркало установлено в жесткой металлической оправе, имеющей возможность поворачиваться на некоторый угол относительно опорной плиты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Ось, вокруг которой поворачивается зеркало B , пересекается в одной точке с нормалью к геометрическому центру зеркала. Расстояние между точкой пересечения осей и отражающей поверхностью зеркала выполнено минимально возможным и составляет 70 мм. Горизонтальная и вертикальная оси поворота зеркал A_1 и A_2 параллельны соответствующим осям зеркала B . Эта ось, общая для зеркал A_1 и A_2 , пересекается между собой и с оптической осью камеры в одной точке, расстояние от которой до поверхности зеркал также 70 мм. При таких расстояниях продольное смещение зеркал вдоль оси при их поворотах не превышает $1 \cdot 10^{-3}$ мм. Дистанционный поворот всех зеркал осуществляется электродвигателями типа ДПМ-25 через винтовые механизмы и редукторы с передаточным отношением около 3600. Каждое зеркало имеет по два таких устройства (по одному для каждого направле-

Рис. 4. Блок зеркал A_1 , A_2

ния движения). Все оси поворотов опираются на подшипники качения, мертвые ходы (люфты) выбираются пружинами. Описанные приводы позволяют поворачивать зеркала со скоростью от 0,28' до 14' за одну минуту при чувствительности не хуже 1%. Угол поворота для изменения числа ходов от 4 до 68 составляет около 12°.

Конструкция крепления зеркал предусматривает возможность выдвижения блоков зеркал из кюветы для проведения профилактических осмотров и ремонтов систем юстировки, замены и чистки зеркал и т. п. С этой целью траверсы скреплены регулируемыми стержневыми фермами с тележками, движущимися по рельсам, расположенным на верхних частях рамных конструкций. Фиксация положения зеркал при выдвижении их в кювету обеспечивается имеющимися у траверсы коническими штифтами, входящими в отверстия в станинах. Вид блока зеркал A_1 и A_2 вне кюветы показан на рис. 4.

Крышка кюветы, возле которой расположено зеркало B , имеет два отверстия для входа и выхода излучения. Закрывающие эти отверстия окна-фильтры Φ_1 и Φ_2 выполнены легко съемными, чтобы иметь возможность быстро устанавливать пластинки из различных материалов (ИКС-24, КРС-6, кварц и т. п.).

Осветитель и спектрометр, выполненные в виде отдельных приборов, размещаются на специальном столе, установленном на том же фундаменте, что и станина зеркала B . Стол скреплен со станиной болтами для обеспечения достаточно жесткой связи оптических элементов кюветы с осветителем и спектрометром, которые соединены с корпусом кюветы мягкими кожухами. Через эти кожухи и сами приборы может осуществляться продувка сухого газообразного азота (путем испарения жидкого азота из сосудов Дюара) для устранения мешающего поглощения водяного пара и углекислого газа.

Изменение режимов и создание искусственных атмосфер

Изменение режимов в кювете осуществляется с помощью специальных тепловой, вакуумной и компрессорной станций. Кроме того, предусмотрена возможность введения в кювету некоторых газов для создания искусственных атмосфер.

Тепловая станция обеспечивает разогрев или охлаждение трубы и автоматическое длительное поддержание любой температуры в диапазоне от 20 до 80°. Вода заданной температуры с помощью циркуляционного насоса типа 2КМ-66 подается в центральную часть межтрубного пространства и движется по спиральным каналам в концы, возвращаясь затем к тепловой станции. В состав тепловой станции входят два пароводяных водоподогревателя типа Маздан № 3. Один из них служит для быстрого разогрева кюветы, а другой — для подогрева воды, питающей два небольших водо-водяных водоподогревателя типа МВН-2050-03, предназначенных для поддержания в кювете заданной температуры. Для быстрого охлаждения установлен двухсекционный водоводяной водоохладитель типа МВН 2050-05. Управление тепловой станцией осуществляется дистанционно, заданные температуры поддерживаются автоматически. Измерение температуры производится электротермометрами типа ТСМ-11.

Время разогрева кюветы до 80° равно старому пасп. Разница температур по длине кюветы не превышает 1°. Длительное поддержание любой заданной температуры в интервале 20—80° возможно с погрешностью не более 1°.

Вакуумная станция предназначена для создания в кювете разрежения до 10^{-1} торр. Насос РВН-30 позволяет достигнуть разрежения до 30 торр за 5 мин. форвакуумный насос ВН-4Г — до $2 \cdot 10^{-2}$ торр за два-три часа. Разрежение до $2 \cdot 10^{-4}$ торр получается с помощью вакуумного агрегата ВА-8-4. Для предотвращения попадания в кювету масляных паров между станцией и кюветой установлена ловушка ДУ-300. Измерение разрежения до 30 торр осуществляется датчиком МЭД-03 модели 2303 с автоматическим самопишущим прибором ДСП-01, ниже 30 торр — ионизационным термопарным вакуумметром ВИТ-1А.

Компрессорная станция, состоящая из компрессорного типа ВУ-3/8 и сепаратора осушки воздуха УОВ-20, позволяет создавать давление до 5 ата. Давление измеряется датчиком МЭД-03 модели 2303 с прибором ДСП-07.

Ввод водяного пара в кювету осуществляется из испарительного устройства, созданного на основе модернизированного промышленного термостата ТС-16 и позволяющего в интервале от 20 до 90° поддерживать любую заданную температуру. Предварительный контроль влажности осуществляется психрометрическим методом с использованием электротермометров. Погрешность при относительной влажности 20—98% не выше 5%.

Ввод азота в кювету производится методом испарения жидкого азота с помощью электронагревателя. Чтобы устранить воз-

возможность взрыва, устройство имеет предохранительный клапан, позволяющий сбрасывать давление азота при достижении им некоторой критической величины.

Ввод углекислого газа в кювету производится из баллонов через систему двухкаскадного обезвоживания. Первый каскад — слой силикагеля, второй — змеевик, находящийся в жидком азоте. Остаточное содержание водяного пара в углекислом газе, подаваемом в кювету, не превышает насыщающего при температуре жидкого азота. (Через это устройство можно вводить другие газы из баллонов.) Содержание CO_2 в кювете определяется с помощью промышленного химического газоанализатора СВ-7633 с погрешностью не выше 5%.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить искреннюю благодарность сотрудникам конструкторского бюро ИЭМ за помощь в разработке технической документации и сотрудникам экспериментальной приборостроительной мастерской за изготовление узлов и монтаж кюветы, а также Г. А. Приткову за участие в наладке и отстройке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Badger R. W., Bonner E. G., Grass P. C. An absorption tube for the investigation of gases in the photographic infrared. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1939, vol. 25, No. 11, 355.
2. Spenser H. and Bonner E. G. Note of the continuous absorption of N_2O . — *J. Chem. Phys.*, 1940, vol. 8, No. 1.
3. Нерман Л. Spectre d'absorption de l'oxygene. — *Annal Phys.*, 1936, vol. 11.
4. Митрофанова Л. А., Жукова Л. Н., Дерягина Т. Е. Установка и метод газе оптической трубки с большим поглощающим путем для исследования молекулярных спектров. — *Изв. ГАО*, 1964, т. XXIII, вып. 5, № 176.
5. Митрофанова Л. А. Новая астрофизическая лаборатория Пулковской обсерватории. — *Изв. ГАО*, 1964, т. XXIV, вып. 1, № 177.
6. Leighton P. A. and Vailman D. H. An absorption for the investigation of gases at low pressures. — *J. Opt. Soc. Amer.*, 1943, vol. 33, 2.
7. Strong J. Apparatus for spectroscopic studies in the intermediate infrared region — 20 to 40 μ . — *Rev. Sci. Instr.*, 1932, vol. 3, New Ser., No. 12.
8. Smith H. D. and Marsh J. K. Method for obtaining long optical paths. — *J. Opt. Soc. Am.*, 1940, vol. 30, No. 8.
9. Kraitz H. R. and Mack J. K. An improved method for obtaining a long optical path in a limited space. — *Phys. Rev.*, 1940, vol. 57, No. 11, Sec. 2.
10. Taylor J. H., Benedict W. S. and Strong J. Infrared spectra of H_2O and CO_2 at 500°C. — *J. Chem. Phys.*, 1952, vol. 20, No. 12.
11. Дьяков Клоков В. М. Спектры поглощения кислорода при давлениях 2—35 атм в области 12600—3600 \AA . — «Оптика и спектроскопия», 1964, т. XVI, вып. 3.
12. Love H. D. J. and Strong J. Long-path study of infrared absorption and emission. — *Appl. Opt.*, vol. 8, 1969.
13. White J. U. Long optical path of large aperture. — *J. Opt. Soc. Am.*, 1942, vol. 32, No. 5.
14. Bernstein H. J., Herzberg G. Rotation-vibration spectra of diatomic and simple poly-atomic molecules with long absorbing paths. 1. The spectrum of fluorocarbonyl (CHF_3) from 2.4 to 0.7 μ . — *J. Chem. Phys.*, vol. 16, No. 1, 1948.
15. Lord P. C., McDonald R. S. and Miller F. A. Notes on the practical infrared spectroscopy. — *J. Opt. Soc. Am.*, 1932, vol. 42, No. 3.
16. Pilon R. G. and White J. U. A long path gas absorption cell. — *J. Opt. Soc. Am.*, 1954, vol. 44, No. 7.

17. Adams R. M. and Katz L. I. New variable thickness infrared cell and the infrared spectra of HF, DF, H₂O, D₂O. — J. Opt. Soc. Am., 1956, vol. 46 No. 10.
18. Howard J. H., Burch D. E., Williams D. Infrared transmission of synthetic atmospheres. I. Instrumentation. — J. Opt. Soc. Am., 1956, vol. 46 No. 3.
19. Stephens E. R. Long-path infrared spectroscopy for air pollution research. — Appl. Spectrosc., 1958, vol. 12, No. 3.
20. White J. L. and Albert N. L. Wide range infrared absorption cells. — J. Opt. Soc. Am., 1958, vol. 48, No. 7.
21. Edwards T. H. Multiple-transverse absorption cell design. — J. Opt. Soc. Am., 1961, vol. 51, No. 1.
22. Gryznak D. A. and Shaw J. H. Study of the total absorption near 4.7 by two samples of CO as their total pressures and CO concentration were independently varied. — J. Opt. Soc. Am., 1962, vol. 52 No. 5.
23. McCubbin T. K. and Grossa R. P. A white-type multiple-pass absorption cell of simple construction. — Appl. Opt., 1963, vol. 2, No. 7.
24. Rank D. H., Fink U., Felz J. V. and Wiggins T. A. Intensity measurements on spectra of gases of planetary interest II, H₂O, CO₂. — Astrophys. J., 1964, vol. 140, No. 1.
25. Owen T. C. Comparisons of laboratory and planetary spectra. III. The spectrum of Jupiter from 7750 to 8800 Å. Astrophys. J., 1965, vol. 142, No. 2.
26. Burch D. E., Gryznak D. A., Patty R. R. Absorption of infrared radiation by CO₂ and H₂O. Experimental techniques. — J. Opt. Soc. Am., 1967, vol. 57, No. 7.
27. Abplanalp H., Günzinger R. and Günthard H. H. Long path cell for Beckin-Elmer model 225 spectrophotometer. — Appl. Opt., vol. 7, No. 11, 1968.
28. McCoy J. H., Rensch D. B. and Long R. K. Water vapour continuum absorption of carbon dioxide laser radiation near 10 μ. — Appl. Opt., 1969, vol. 8, No. 7.
29. Bignall K. J. The water-vapour infrared continuum. — Quart. J. Roy. Met. Soc., 1970, vol. 96, No. 409.
30. McKellar A. R. W., Rich N. and Soots V. An optical cell for long path lengths at low temperatures. — Appl. Opt., 1970, vol. 9, No. 4.
31. Horn D. and Pimentel G. C. 2.5 km low-temperature multipireflection cell. — Appl. Opt., 1971, vol. 10, No. 8.
32. Непорочит Б. С., Василевский К. П., Давыд Н. А. и Фуреликова В. А. Вакуумный спектрометр с дифракционной решеткой для области спектра 0,7—3 мкм. — «Оптика и спектроскопия», 1957, т. 3, вып. 4.
33. Антонец Б. А., Зуев В. Е., Сапожников В. А. Экспериментальное исследование поглощения излучения газового лазера с длиной волны 1,15 мкм в атмосфере. — Изв. ВУЗов. Сер. физ. 1967, № 6 (61).
34. Дзянов-Клюков В. И., Маташева О. А. Спектр поглощения кислорода в области 1,3—0,23 мкм и роль коротковолновых комплексов (O₂)_n (O₂-N₂). — Изв. АН СССР, физ. хим. и механика, 1968, т. 14, № 4.
35. Аранбская К. А., Зряевский А. Ю., Колосов М. А., Соколов А. В. Исследование зависимости поглощения от давления воздуха на длинах волны 0,29, 0,35 и 0,45 мкм. — «Радиотехника и электроника», 1971, т. XVI, № 9.
36. Голубицкий Б. М., Москаленко Н. И. Измерение спектрального поглощения CO₂ в условиях искусственной атмосферы. — Изв. АН СССР, физ. хим. и механика, 1969, т. 15, № 1.
37. Броуштейн А. М., Демидов В. В., Сохин И. Л. Инфракрасная атмосферная установка (ИКАМ-1) для исследования спектральной прозрачности. — Труды ГГО, 1973, вып. 312.
38. Волковидский О. А. Комплекс экспериментальных установок для геофизических исследований. — «Метеорология и гидрология», 1965, № 6.
39. Дзянов-Клюков В. И., Палицына И. А., Стаховский А. Д. Усовершенствованное регистрирующее устройство для диапазона частот 0—500 Гц.— ПТЭ, 1963, № 6.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Вып. 8(81)

1978 г.

ПОЛЕВОЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СОДЕРЖАНИЯ В АТМОСФЕРЕ
ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ГАЗОВ

В. И. АРЕФЬЕВ, В. И. ДВАНОВ-КЛОКОВ, Н. П. МАЛКОВ

Одной из важнейших задач международной программы мониторинга внешней среды являются постоянные измерения фонового содержания в атмосфере окиси и двуокиси углерода, окислов азота и других газов, имеющих сильные полосы поглощения в инфракрасной области спектра, что позволяет использовать для определения концентраций исследуемых газов весьма перспективный спектральный метод [1—3]. Принципы метода известны: с помощью спектральной аппаратуры записывается в области полосы поглощения исследуемого газа спектр солнечного излучения, прошедшего через атмосферу, а затем по величине поглощения определяется его интегральное содержание. В отличие от «локальных методов» такой вариант спектрального метода позволяет получить среднее значение концентрации газа во всей толще атмосферы, причем на это значение практически не влияют слабые местные источники этого газа.

Одна из основных трудностей реализации метода — отсутствие стандартной аппаратуры, пригодной для работы в полевых условиях. В настоящей работе приводится описание многоцелевого полевого спектрального комплекса для исследований в области спектра 0,3—20 мкм. Комплекс, разработанный в ИФА АН СССР и несколько модернизированный в ИЭМ ГИГМС, используется в течение ряда лет для изучения содержания в атмосфере CO , CO_2 , CH_4 , N_2O , а также континуума водяного пара в окне прозрачности 8—12 мкм [4—6].

Комплекс состоит из трех основных частей: системы слежения за Солнцем с питающей оптикой, собственно спектрометра, системы записи спектра на перфоленту. Блок-схема комплекса приведена на рис. 1.

Система слежения за Солнцем включает в себя следующее зеркало Z_1 диаметром 400 мм, которое заключено в оправу, крепящуюся в вертикально расположенной вилке. Зеркало по отношению к вилке может поворачиваться на угол около 60° с помощью мотора РД-09 (1) через червячный редуктор (коэффициент редукции

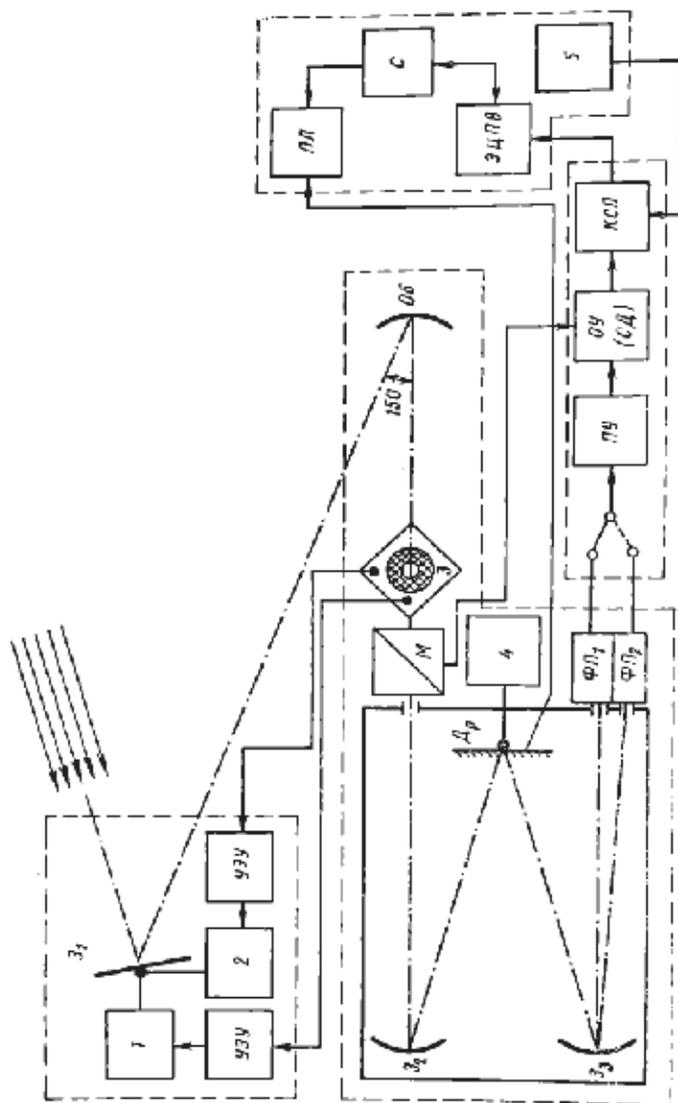


Рис. 1. Блок-схема комплекса

1. 280). Вилка вместе с зеркалом с помощью таких же мотора и редуктора (2) вращается вокруг вертикальной оси. Весь узел следящего зеркала крепится на треноге, высота которой регулируется.

На оптической оси, проходящей через центр следящего зеркала и направленной приблизительно с севера на юг, находится преломляющая оптика: зеркальный объектив (Об) диаметром 200 мм, с фокусным расстоянием 1 м в одних вариантах и объектив типа Кассегрена $D = 300$ мм в других. Угол между осью следящего зеркала-объектива и осью монохроматора составляет около 15° при использовании зеркального объектива с $D = 200$ мм, а в другом варианте монохроматор размещается прямо на оси следящего зеркала-объектива. Объектив крепится на рельсе монохроматора и фокусирует изображение Солнца на входной щели монохроматора, вблизи которой на том же рельсе размещается узел управления следящим зеркалом (3).

Этот узел содержит четыре фотоэлемента ФЭС, расположенных попарно и взаимно перпендикулярно в кожухе вокруг отверстия, которое несколько меньше сечения солнечного лучка. Таким образом, каждый фотоэлемент оказывается освещенным периферическими частями светового пучка. Для регулировки интенсивности света, падающего на фотоэлементы, служат радиально расположенные, регулируемые по шарнире щели, закрываемые сетками. Изменяя размер щелей или количество стоек, освещенность фотоэлементов уменьшают так, чтобы следящая система не «выскочила». Для центрирования светового пучка на входной щели монохроматора используется пара фотоэлементов с переменным сопротивлением 100 Ом, которые составляют мостиковую схему. Рассогласование схемы вследствие смещения солнечного пучка приводит к образованию электрического сигнала, который после усиления (усилитель УЭТ 1 или УЭУ М) приводит в движение мотор РД-09, вращающий следящее зеркало по соответствующей координате.

Спектрометр состоит из монохроматора, фотоприемника и узкополосного регистрирующего устройства с самоввесом.

Монохроматор собран в легком и очень жестком кожухе из дюралюминия по горизонтально-симметричной коллимационной схеме. Сканирование спектра осуществляется поворотом дифракционной решетки (D_0) с помощью мотора ДСДР-2 через редуктор, обеспечивающий долгие скорости вращения криво 2 от 1:1 до 1:256 (4). Для перекрытия области от 0,3 до 20 мкм используются легко заменяемые решетки размером 140×150 мм с числом штрихов 1200, 600, 300 и 100 на один мм. Зеркалами монохроматора Z_1 и Z_2 служат параболические зеркала от стандартного спектрометра ДФС-12. В фокусе зеркал ($f = 822$ мм) находятся входная спектральная щель УФ-11 и две близко расположенные выходные — УФ-13. На выходные щели в зависимости от исследуемой области спектра крепятся различные фотоприемники (ФП): фотумножители, фотосопротивления на основе PbS, GeAu или InSb (охлаждаемые жидким азотом и неохлаждаемые), икелетные фотометры. Для наблюдения спектров высших порядков использо-

нат набор интерференционных фильтров к спектрометру ИКС-10. Электрические сигналы от фотоприемников, установленных на двух выходных щелях, через переключатель поступают на одно и то же узкополосное регистрирующее устройство — УРУ. Такое решение обеспечивает возможность быстрого перехода при измерениях поглощения в двух интервалах длин волн, требующих применения различных фотоприемников (например, в полосах CO с центром около 4,6 мкм и CO_2 с центром около 2,06 мкм)¹.

Узкополосное универсальное регистрирующее устройство состоит из предусилителя (ПУ) и основного усилителя (ОУ) с синхронным детектором (СД), выход которого соединяется с самописцем типа ЭПП-09 или КСП-4. УРУ позволяет при устанавливаемой эффективной шумовой полосе в пределах 0–0,1 Гц вести измерения электрических сигналов от датчиков с внутренним сопротивлением до $3 \cdot 10^6$ Ом в диапазоне частот 5–5000 Гц. Приципиальная схема УРУ и его подробное описание приведены в [7].

Механический обтюратор (М) представляет собой легкий металлический диск диаметром 190 мм с 20 трапециевидными вырезами. Вращение диска мотором Г-31 (3000 об/мин) обеспечивает модуляцию солнечного излучения, падающего в спектрометр, с частотой 1000 Гц. На валу того же мотора жестко укреплено кольцо из магнито-твердого сплава, намагниченное таким образом, чтобы на нем равномерно размещалось 20 пар полюсов. При вращении кольца в неподвижной катушке возникает переменный sinusoidalный электрический ток с частотой 1000 Гц, который служит опорным напряжением для синхронного детектора. Механический обтюратор с генератором опорных напряжений располагается на рельсе монохроматора в непосредственной близости к входной щели для того, чтобы степень модуляции потока излучения была максимальной.

Система записи спектра на перфоленту выполнена в двух вариантах. В первом из них, подробно описанном в [8], преобразование непрерывного спектра, записываемого на диаграммной ленте самописца, в дискретный код осуществляется цифровым вольтметром ЭЦПВ-3. Сигнал на вход вольтметра подается в дополнительного реохорда самописца КСП-4, запитанного от стабилизированного источника питания БПС-591. Цифровой вольтметр преобразует непрерывно меняющееся пропорционально ординатам спектра напряжение с дополнительного реохорда в двоично-десятичный код. Блок «Сапфир» (С) [9] управляет работой вольтметра и перфоратора ПЛ-80/8. Привязка ординат спектра к швалу длин волн осуществляется с помощью специального отметчика, жестко связанного с механизмом поворота дифракционной решетки. При заданном значении длины волны с отметчика на перфоратор поступает электрический импульс, означающий начало отсчета длин волн. Дальнейшая привязка затем производится по времени.

¹ Разрешения, достигаемое в этом случае на «звешевой» выходной щели, несколько хуже, чем на «заушней».

Во втором варианте система записи спектра на перфоленту собрана на выноскаемых промышленностью стандартных блоках К-200. При этом вместо дополнительного реохорда сигнал снимается с последней лампы основного усилителя через трансформатор.

Конструктивно полевой спектральный комплекс оформлен в виде отдельных узлов или блоков, омерченных на рис. 1 петриховыми линиями. Один из вариантов комплекса размещен и жестко закреплен в автофургоне, что облегчает как транспортировку, так и оперативное развертывание комплекса для измерений в полевых условиях.

Спектральные характеристики комплекса зависят от области исследуемых длин волн, типа дифракционной решетки, используемого фотоприемника и т. д. Для иллюстрации возможностей комплекса на рис. 2 приведен участок полосы поглощения CO с центром около 4,6 мкм, записанный с разрешением несколько лучше $0,2 \text{ см}^{-1}$.

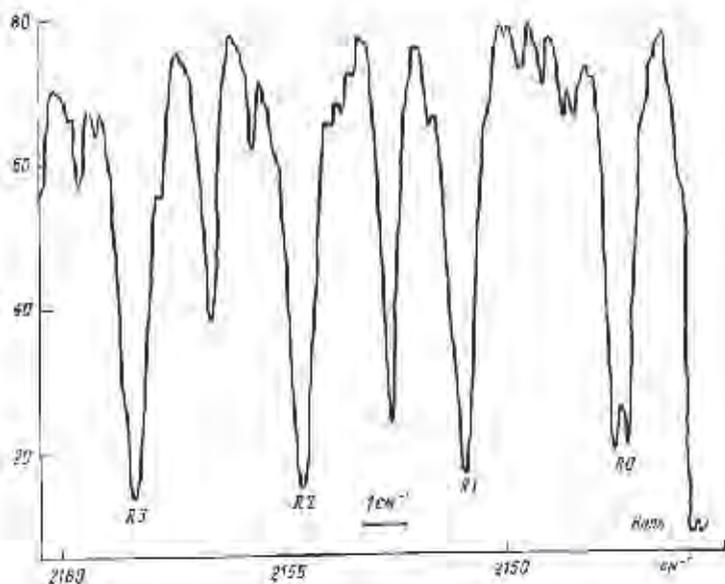


Рис. 2. Спектр полосы поглощения CO с центром около 4,6 мкм

Эксплуатация комплекса в течение ряда лет в различных географических и климатических районах при изучении загрязнений атмосферы и решении некоторых других задач (например, [4—6]) подтверждает его высокую мобильность и надежность работы аппаратуры в полевых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптический метод определения содержания CO_2 в вертикальном столбе атмосферы — «Труды ГГО», 1976, вып. 369, с. 5—24. Авт.: А. М. Броунштейн, Н. И. Парампинова, А. Д. Фролов, А. А. Шашков.
2. Фролов А. Д. Оптический метод определения общего содержания окиси углерода в вертикальном столбе атмосферы. — «Труды ГГО», 1976, вып. 389, с. 25—40.
3. Киселева М. С. Современные данные о содержании поглощающих газовых компонент в тропо- и стратосфере (см. настоящей сборник).
4. О kontinuierlichen ослаблении в окне 8—13 мкм в условиях высокой прозрачности атмосферы — «Изв. АН СССР. ФАО», 1975, 11, № 7, с. 690—695. Авт.: Т. Г. Алкис, В. И. Дванов-Клоков, В. М. Иванов, А. И. Семенов.
5. Лухшил В. В., Фикеева Е. В., Юрганов Л. Н. Определение содержания окиси углерода во всей толще атмосферы над городом. — «Изв. АН СССР. ФАО», 1976, 12, № 5, с. 557—559.
6. Мадков И. П., Юрганов Л. Н., Дванов-Клоков В. И. Измерения содержания CO и CH_4 в северном и южном полушариях (предварительные результаты). — «Изв. АН СССР. ФАО», 1976, 12, № 11, с. 1218—1221.
7. Дванов-Клоков В. И., Палицына И. А., Стаховский А. Д. Узкополосное регистрирующее устройство для диапазона частот 5—5000 Гц. — «ПТЭ», 1963, № 6, с. 89—92.
8. Арефьев В. Н., Мамонтов И. Г., Сизов А. И. Автоматизация обработки спектров поглощения атмосферных газов — «Труды ИЭМ», 1974, вып. 2(51), с. 90—93.
9. Иванов В. Н., Мазаурин Н. Ф. Простые системы автоматической перфорации — «Метеорология и гидрология», 1966, № 7, с. 54—57.

*С.С. Хмелевцов, Ю.Г. Кяуфман, В.А. Коршунов,
Е.Д. Светоюров, А.С. Хмелевцов*

ЛАЗЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ОБНИНСКОЙ ЛИДАРНОЙ СТАНЦИИ НПО "ТАЙФУН"

Введение

Обнинская лидарная станция была создана в 1985 г. для проведения систематических исследований атмосферного аэрозоля и измерения концентрации озона. Одним из важных направлений работы станции является проведение параллельных измерений аэрозоля и озона в стратосфере. В составе станции имеются как стационарные лидары, так и мобильный лидарный комплекс "Макет-2".

После создания Обнинской лидарной станции в НПО "Тайфун" была проведена работа по созданию и эксплуатации небольшой сети станций, предназначенных для зондирования атмосферного (главным образом стратосферного) аэрозоля. В 1987 г. были проведены первые измерения на Минской лидарной станции, в 1988 г. - на станциях, расположенных в пос. Теплоключенка (Кыргызстан) и г. Камагуэй (Куба). На всей сети были внедрены единые методики измерений, обработки и архивации данных. Результаты измерений собирались в банк данных стратосферного аэрозоля, созданный в НПО "Тайфун". К сожалению, в настоящее время в связи с распадом СССР и проблемами финансового характера в банк данных поступают результаты измерений, получаемые только на Обнинской станции. Данные измерений публикуются в *Bulletin of the global volcanism network (Smithsonian Institution)*.

Озон и аэрозоль играют большую роль в химии атмосферы, формировании ее радиационного баланса и традиционно являются важными объектами атмосферных исследований. До недавнего времени оба этих объекта исследовались относительно независимо друг от друга. В 1989 г. американские исследователи Хофман и Соломон, основываясь на данных измерений озона и аэрозоля, проведенных в 1982-1985 гг., высказали

предположение в том, что уменьшение содержания озона в средних широтах в 1983 г. (которое было максимальным за последние 20 лет наблюдений) было обусловлено многократным ростом стратосферного аэрозоля, последовавшим за крупным извержением вулкана Эль-Чичон. Для объяснения связи между этими явлениями они привлекли механизм гетерогенных реакций, проходящих на поверхности капаль сульфатного аэрозоля, в результате которых сравнительно пассивные хлорсодержащие газы преобразуются в значительно более активные радикалы хлора, вызывающие затем разрушение озона. Подобный же механизм образования активных соединений хлора за счет гетерогенных реакций на поверхности частиц полярных стратосферных облаков предлагается в настоящее время для объяснения образования озоновых дыр в полярных областях.

Исследование воздействия стратосферного аэрозоля на озон имеет важное практическое значение, так как, независимо от временных возрастаний массы стратосферного аэрозоля, связанных с крупными вулканическими извержениями, наблюдается постоянный рост (порядка 5 % в год, в основном за счет антропогенных факторов) фоновый уровень стратосферного аэрозольного слоя. В случае подтверждения указанного выше эффекта влияния аэрозоля на озоновый слой рост фоновый содержания стратосферного аэрозоля может привести к снижению общего содержания озона.

Поэтому данные одновременных измерений озона и аэрозоля, полученные с помощью одновитной техники, послужат основой для анализа как указанных механизмов, так и прогноза возможных изменений озонового слоя.

Следует отметить еще один важный аргумент в пользу проведения одновременных аэрозольно-озоновых измерений. Известно, что для измерения вертикального профиля озона лидарным методом применяется метод дифференциального поглощения. Использование этого метода требует знания аэрозольных коэффициентов обратного рассеяния и экстинкции. Обычно эти коэффициенты задаются с помощью моделей, что, в общем случае, снижает точность измерений. Однако в пе-

риоды повышенного содержания аэрозолей в стратосфере (например, после извержения вулкана Пинатубо) это обстоятельство зачастую приводит к таким ошибкам, которые делают анализ измерений невозможным. Использование реально измеренных характеристик аэрозоля позволяет решить эту проблему.

1. Результаты многолетних измерений стратосферного аэрозоля

Стратосферный аэрозоль и его мониторинг

Впервые характеристики стратосферного аэрозоля (СА) были определены Юнге с помощью счетчика ядер Айткена и импактора, поднятого в стратосферу. Юнге показал, что основной массой частиц в нижней стратосфере являются капли раствора серной кислоты. Кроме них в стратосфере имеются твердые частицы, вынесенные из тропосферы, и частицы космического происхождения, образующиеся при распаде метеорных тел в верхней атмосфере.

Выполненные в дальнейшем многочисленные исследования составя СА подтвердили, что в периоды без вулканических извержений и через несколько месяцев после извержений СА состоит в основном из капель раствора серной кислоты. Концентрация раствора в среднем равна 75 % и изменяется в незначительных пределах в зависимости от условий в стратосфере (температуры, влажности воздуха и парциального давления паров серной кислоты). Максимум концентрации наблюдается на высоте 7-8 км над местной тропопаузой, то есть высота максимума над уровнем земли может варьироваться от 16-17 в полярных районах до 23-24 км в тропической зоне.

Формируется СА в основном за счет сернистого газа, образующегося в стратосфере при фотодиссоциации поступающего вюда карбонилсульфида, и за счет сернистого газа, поступающего непосредственно в стратосферу при вулканических извержениях. Крупные вулканические извержения являются мощным фактором воздействия на СА и могут вызвать увеличение его массы в десятки и более раз. В периоды длительного (4-6 лет) отсутствия крупных вулканических извержений со-

держание аэрозоля в стратосфере можно условно считать фоновым.

Являясь оптически активным компонентом атмосферы, СА оказывает влияние на радиационный баланс и, следовательно, на климатические параметры атмосферы. С целью оповещения чувствительности земной климатической системы к СА и его учета при климатических прогнозах необходимо осуществлять постоянный мониторинг СА.

Для мониторинга стратосферного аэрозоля применяются следующие основные методы:

Измерение прозрачности всей толщи атмосферы с помощью фотометров. Точность метода низка и не позволяет исследовать фоновый аэрозоль.

Измерение параметров СА с помощью поднимаемой на шарах аппаратуры для счета частиц и для определения проницаемости аэрозоля. Большой вклад в развитие этого метода сделали д-р Розен и д-р Хофман. С помощью этой аппаратуры на протяжении многих лет были проведены замечательные серии измерений и получено много новых данных о СА.

Измерение параметров СА с помощью космических средств является очень полезным для получения климатических параметров глобального стратосферного аэрозольного слоя. Блестящие работы в этом направлении выполнены рядом групп исследователей, одна из которых возглавляется д-ром Мак-Кормиком.

Лидарные измерения стратосферного аэрозоля занимают важное место в системе климатического мониторинга стратосферного аэрозоля благодаря дистанционности измерений, большой разрешающей способности по высоте и дешевизне измерений. В связи с этим имеется ряд лидарных станций, которые ведут непрерывные наблюдения за СА на протяжении длительного времени. Одной из первых в мире (с 1973 г.) начала проводить такие наблюдения лидарная станция Обсерватория Мауна Лоа (США, Гавайи).

Методика измерений стратосферного аэрозоля

Для характеристики вертикального профиля стратосферного аэрозоля используется общепринятый параметр - $R(z)$, кото-

рый определяется как отношение суммы коэффициентов обратного молекулярного и аэрозольного рассеяния к коэффициенту обратного молекулярного рассеяния

$$R(z) = \frac{\beta_{\pi}^A(z) + \beta_{\pi}^M(z)}{\beta_{\pi}^M(z)}, \quad (1)$$

где $\beta_{\pi}^A(z)$ и $\beta_{\pi}^M(z)$ - коэффициенты аэрозольного и молекулярного обратного рассеяния на высоте z .

Другой общепринятый параметр - интеграл обратного рассеяния $J(z_1, z_2)$ используется для характеристики общего содержания аэрозоля в слое, ограниченном высотами z_1 и z_2 :

$$J(z_1, z_2) = \int_{z_1}^{z_2} \beta_{\pi}^A(z) dz. \quad (2)$$

$R(z)$ рассчитывается в соответствии с методикой, изложенной в [25]. Сигнал обратного рассеяния, регистрируемый в процессе измерений, прямо пропорционален числителю в выражении для $R(z)$. Знаменатель, равный коэффициенту обратного молекулярного рассеяния, рассчитывается по данным аэрологического зондирования. При отсутствии аэрозолевых данных и в области высот, превышающих высоту полета радиозонда, используются модельные данные [22]. Таким образом, строится относительный профиль $R(z)$, привязка которого осуществляется затем путем присваивания априорного значения R в области минимума аэрозольного рассеяния. Обычно полагают значение R в точке привязки равным 1,01-1,02.

Мы модифицировали этот метод, введя учет ослабления зондирующего излучения за счет рассеяния аэрозолем и поглощения озоном.

Поглощение озоном рассчитывается по модельным данным. Ошибка в определении R , обусловленная реальными вариациями концентрации озона в атмосфере, не превышает при этом 1 %.

Аэрозольное ослабление рассчитывается непосредственно по результатам измерений. При этом лидарное отношение (отно-

шение коэффициента рассеяния к коэффициенту обратного рассеяния) для стратосферного аэрозоля считается постоянным и равным 57, что соответствует параметрам модели SA [29]. Используемая нами модификация позволяет уменьшить ошибку в определении L в условиях фонового содержания SA на 10-15 %.

Ошибки определения $R(z)$, $\beta_{\pi}^{\alpha}(z)$ и $L(z_1, z_2)$ рассчитываются в соответствии с [25]. Главным образом они зависят от величины значения $R(z)$ и величины сигнала обратного рассеяния. В среднем в интервале высот от 10 до 30 км ошибка определения $R(z)$ выходит в пределах 3-8 %, а ошибка определения $\beta_{\pi}^{\alpha}(z)$ - в пределах 8-40 %.

Описание аппаратуры

Первые измерения SA на Обнинской лидарной станции проводились с помощью рубинового лазера на длине волны 0,69 мкм. С 1987 по 1990 г. измерения проводились с помощью лидара "Макет-1", работающего на длине волны 0,58 мкм [7]. Идентичные лидары установлены на станциях в г. Минске и пос. Теплоключенка.

Лидар состоит из импульсного лазера с автономной системой охлаждения, приемного телескопа и информационно-измерительной системы. Импульсный лазер на алюмоиттриевом гранате (ИЛТИ-405) размещается непосредственно на приемном телескопе. Зондирование (в режиме мониторинга) ведется на одной длине волны 0,582 мкм, энергия излучения - 40 мДж в импульсе, длительность импульса - 20 нс, расходимость излучения (после коллиматора) - 1,5. Частота следования импульсов - до 25 Гц. Система охлаждения лазерной головки - жидкостная двухконтурная. Теплоноситель - дистиллированная вода.

Приемный телескоп выполнен по схеме Кассегрена, диаметр главного зеркала - 0,5 м. Телескоп укреплен на альтазимутальной подвеске, обеспечивающей изменение угла места телескопа и излучателя от -10 до +90° и азимута от 0 до 360°. Прием и регистрация рассеянного излучения ведется в режиме счета фотонов. Выделение длины волны зондирующего излу-

чения осуществляется с помощью интерференционного светофильтра. Поле зрения телескопа регулируется в пределах от 2 до 10°. Для предотвращения засветки фотоприемника мощным сигналом рассеяния из ближней зоны используется механический obturator. Начало регистрации по трассе зондирования может при этом изменяться от 0 до 85 км.

Информационно-измерительная система (ИИС) лидара служит для управления процессом измерений, регистрации и обработки сигнала обратного рассеяния. ИИС позволяет вести регистрацию сигнала одновременно по четырем независимым каналам. Число точек по трассе зондирования может изменяться в пределах от 2 до 510 с шагом от 100 до 10000 м. Результаты первичных измерений наряду с результатами обработки выводятся на печать и записываются на гибкие магнитные диски.

В настоящее время лидар «Макет-1» расположен вблизи южно-корейского города Сувон на совместной Российско-Корейской лидарной станции. Измерения же на Обнинской станции проводятся с помощью лидара «ЛД-2». Это - двухканальный лидар с диаметром приемного зеркала, равном 30 см.

Методика проведения зондирования атмосферного аэрозоля

Измерение вертикального профиля обратного аэрозольного рассеяния проводится при ориентации установки в зенит. Измерения проводятся в ночное время суток. Для получения необходимой точности осуществляется накопление сигнала (путем сложения профилей) до большого количеству импульсов. При зондировании до высот 30-35 км общее число импульсов составляет 20000-30000. Среднеквадратичная погрешность полезного сигнала составляет при этом 2-3 %, а время измерения - 20-30 мин. Фоновый уровень сигнала измеряется в промежутках между «выстрелами» и вычитается при обработке.

Импульсы лазерного излучения синхронизированы с положением obturatorа таким образом, чтобы регистрация сигнала обратного рассеяния происходила с задержкой по отношению к «выстрелу» на 0-250 мкс (что соответствует по высоте слою 0-35 км). Obturator препятствует попаданию излучения, рас-

сеянного в ближней зоне на ФЭУ, уменьшая тем самым шумы ФЭУ и увеличивая точность измерений в дальней зоне при низких уровнях полезного сигнала. Начало трассы измерений находится обычно на высоте 13-15 км.

При необходимости проведения измерений в интервале высот ниже 13-15 км проводится дополнительная серия "выстрелов" с ослаблением принимаемого излучения в 3-10 раз. "Сшивки" сигналов ближней и дальней зоны осуществляется в области их перекрытия, примерно на 13-19 км, исходя из условия равенства в этой области средних значений сигналов обратного рассеяния, скорректированных на квадрат расстояния.

Управление процессом измерений осуществляется оператором с помощью ЭВМ в режиме диалога. Задаются следующие параметры режима измерений: начальная высота зондирования; вертикальное разрешение; количество точек измерений; энергия зондирующего импульса; число зондирующих импульсов; номера каналов регистрации. Имеется возможность оперативного просмотра полученных данных на экране дисплея.

После сеанса зондирования производится предварительная обработка измерений с использованием модельного профиля плотности воздуха. Окончательная обработка результатов измерений производится после получения и обработки данных аэрологического зондирования.

Результаты обработки наряду с данными первичных измерений поступают в специализированную базу данных СА, реализованную на IBM PC. Наиболее существенная часть информации выводится на печать в виде таблиц и графиков и поступает на хранение в архив.

Результаты измерений СА

За период измерений получены многолетние ряды характеристик обратного рассеяния и оптической толщи стратосферного аэрозоля. На рис. 1 приведен временной ход интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния J для слоя атмосферы от 15 до 30 км за период наблюдений с 1985 по 1996 г. Данные измерений позволяют оценить влияние крупных вулканических извержений на СА. Даты крупных извер-

жений указаны на рис. 1 стрелками на оси X. Из рисунка видно, что наиболее сильное воздействие на слой СА оказало извержение вулкана Пинатубо. Практически все годы, начиная с момента его извержения и до конца 1994 г., наблюдались последствия его возмущающего действия на СА. Зарегистрированные нами значения J достигли максимальных значений в начале 1992 г. и составили в Обнинске и Минске около $4 \cdot 10^{-3}$ ср⁻¹, в Теплоключенке $4,5 \cdot 10^{-3}$ ср⁻¹, в Камагуае $5 \cdot 10^{-3}$ ср⁻¹. Для сравнения следует сказать, что в 1989 г. значение J было в 40-50 раз меньше.

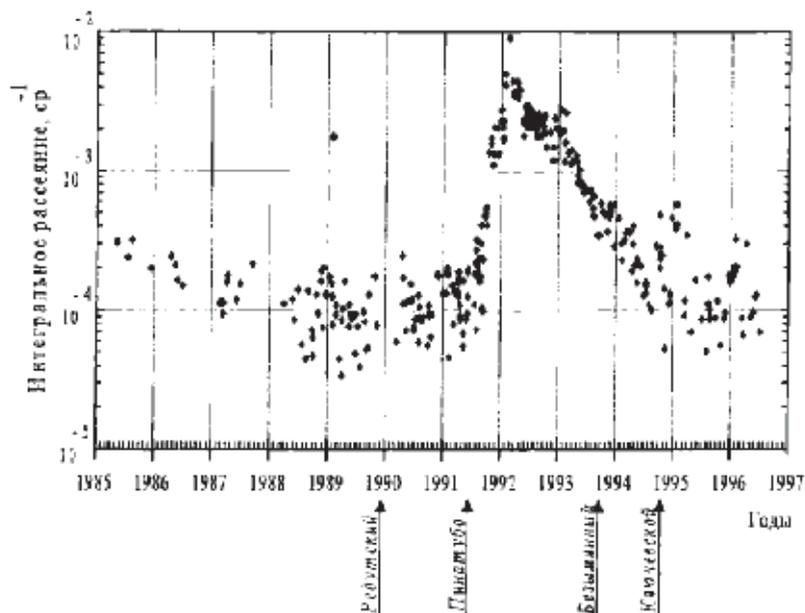


Рис. 1. Интегральные значения коэффициента обратного аэрозольного рассеяния в слое 15-30 км над Обнинском.

Вертикальные профили R , характерные для периода максимального возрастания оптической толщины СА и предшествующего ему фоновому периоду, приведены на рис. 2. С ян-

варя 1992 г. значение J уменьшалось и летом 1996 г. достигло значения $0,7 \cdot 10^{-6} - 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ ср}^{-1}$.

Как уже отмечалось выше, в периоды отсутствия возмущений СА, обусловленных вулканическими извержениями, содержание аэрозоля в стратосфере можно считать фоновым. Оптическая толща фоновых СА невелика, составляет величину порядка 0,003-0,005 и не оказывает существенного влияния на радиационный баланс в атмосфере.

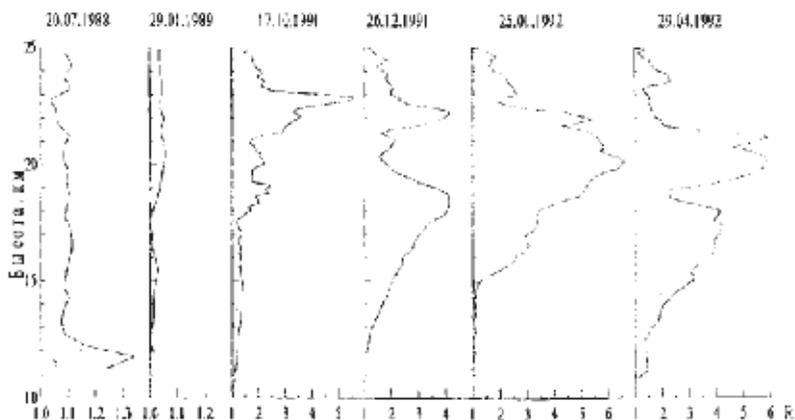


Рис. 2. Высотные профили отношения обратного аэрозольного рассеяния B над Обнинском по данным измерений лидаром "Мисет-1"

Вместе с тем вопрос о возможных изменениях фонового уровня является важным для прогноза долгосрочных климатических изменений. Оценки влияния СА на климат показывают, что увеличение массы СА ведет к понижению приземной температуры.

Помимо климатического эффекта рост фонового содержания СА может привести к уменьшению концентрации озона в стратосфере, так как гетерогенные реакции, проходящие на поверхности капель сульфатного аэрозоля, преобразуют сравнительно пассивные хлорсодержащие газы в значительно более активные радикалы хлора, вызывающие затем разрушение

озона. Сравнение значений J , измеренных на лидарных станциях в 1978 г. в Гармиш-Партенкирхене и 1988-1990 гг. в Обнинске и Минске, в периоды, когда не было крупных извержений, позволило сделать вывод о росте фонового содержания СА [6]. Скорость роста составила при этом 5-7 % в год. Измерения, проведенные с помощью фотоэлектрических счетчиков, устанавливаемых на аэрозондах, также показали наличие роста фонового СА, примерно на 5 % в год [16]. Главной причиной такого роста авторы считают антропогенное воздействие, связанное с ростом числа авиарейсов в верхней тропосфере полярной области.

Данные измерений СА, полученные на Обнинской лидарной станции, показывают, что в начале 1996 г. слой СА еще не достиг стационарного фонового уровня после сильнейшего возмущения, вызванного извержением Пинатубо. По-видимому, летом 1997 г. можно будет определить новое значение фонового уровня СА и провести анализ его временных изменений.

Точка на рис. 1, показывающая аномально высокое значение J , зарегистрированное в начале 1989 г., относится к редкому явлению образования аэрозольных облаков в стратосфере средних широт. Измерения проводились над Обнинском и Минском в ночь с 31-го января на 1-е февраля 1989 г. и показали наличие аэрозольных облаков на высоте 20-25 км [21].

Высотные профили R стратосферного облака приведены на рис. 3. Обратное рассеяние стратосферных облаков было в несколько десятков раз больше, чем обратное рассеяние от фонового СА. Оптическая толщина слоя СА во время измерения на длине волны 532 нм менялась от 0,07 до 0,1, в то время как, например, 5 февраля 1989 г. оптическая толщина фонового слоя СА составляла 0,004. Сравнение лидарных данных со спутниковыми данными (SAGE-2), полученными в эту же ночь над центральной Европой, показали, что они близки друг к другу [21]. Наиболее вероятной причиной появления стратосферных облаков над Обнинском и Минском является мощное похолодание в нижней стратосфере. В области расположения стратосферных облаков температура на высоте 20-23 км понижалась в это время до 192 К.

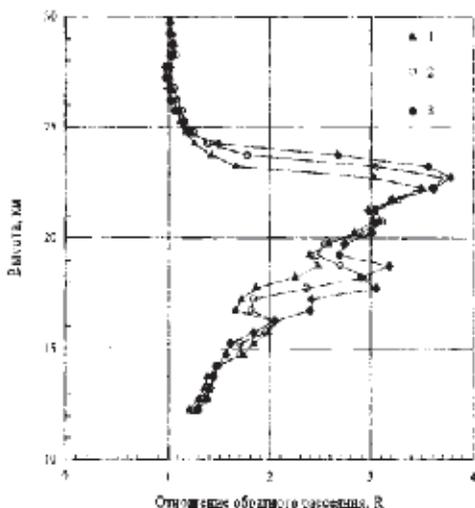


Рис.3. Высотный профиль отношения обратного аэрозольного рассеяния R (для $\lambda = 0,532$ мкм) по данным Обнинской лидарной станции 1 февраля 1989 г. (время местное): 1 - 01 ч 15 мин; 2 - 02 ч 08 мин; 3 - 02 ч 48 мин

Наблюдения стратосферных облаков вне циркумполярного вихря позволяют утверждать, что существуют не только полярные стратосферные облака, но и стратосферные облака умеренных широт.

Выше отмечалось, что одной из первых лидарных станций мониторинга СА является лидарная станция обсерватории Мауна Лоа, расположенная на высоте 3000 м над уровнем моря на о. Хио (Гавайи, США). Использование Обнинского лидара "Макет-1" в советско-американской экспедиции SAGA-III предоставило нам уникальную возможность проведения измерений СА совместно с лидаром обсерватории Мауна Лоа и сопоставления полученных результатов [18].

Во время проведения экспедиции лидар "Макет-1" размещался в специальном контейнере, разделенном на две части, в одной из которых располагалась приемо-передающая аппаратура, а в другой - информационно-измерительная система. Контейнер с лидаром размещался на борту НИС "Академик Королев".

Совместные измерения проводились весной 1990 г. во время

стоянки НИС «Академик Королев» в порту Хило. Результаты измерений приведены на рис. 4. Значение интегрального коэффициента обратного аэрозольного рассеяния (в слое от 15,8 до 30,2 км) для профилей, измеренных лидаром обсерватории Мауна Лоа и лидаром «Макет-2», составляет $6,5 \cdot 10^{-5}$ и $6,8 \cdot 10^{-5} \text{ ср}^{-1}$ соответственно. Учитывая некоторое временное (1 ч) и пространственное (50 км) несоответствие измерений, различие в аппаратуре и алгоритмах обработки, совпадение полученных результатов можно, на наш взгляд, считать вполне удовлетворительным.

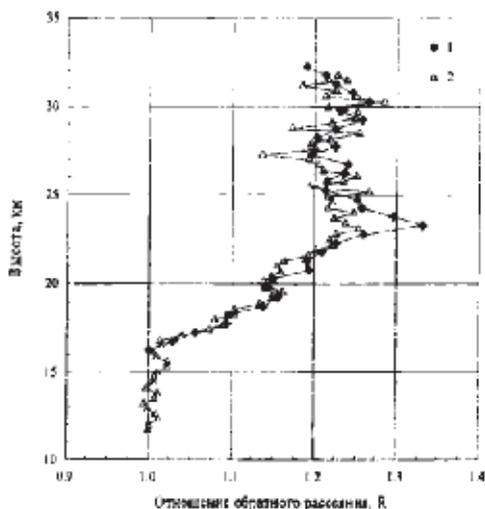


Рис. 4. Российско-американский эксперимент (Гавайи, 1990 г.) по одновременному измерению стратосферного аэрозоля с помощью российского (НИС «Академик Королев», лидар «Макет-1») и американского (обсерватория Мауна Лоа) лидаров: 1 - НИС «Академик Королев»; 2 - Мауна Лоа

Проф. М. А. Петросяну,

начальник Межведомственной геофизической
экспедиции по программе национального
Атлантического тропического эксперимента
(ТРОПЭКС-72)

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИТОГИ МЕЖВЕДОМСТВЕННОЙ ЭКСПЕДИЦИИ ПО ПРОГРАММЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ТРОПИЧЕСКОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ТРОПЭКС-72

(6 июня—19 сентября 1972 г.)

1. Научное и методическое обоснование экспедиции

Создание надежных методов долгосрочного прогноза погоды становится одной из важнейших научных задач нашего времени не только потому, что сам по себе точный долгосрочный прогноз погоды даст неисчислимые экономические выгоды, но также и потому, что достаточно полная теория расчета циркуляции атмосферы позволит ответить на вопрос о возможных изменениях климата, которые могут произойти в результате различных аспектов человеческой деятельности. Совершенно очевидно, что эта задача по существу своему глобальна и для решения требует рассмотрения совместного поведения системы атмосфера—деятельный слой подстилающей поверхности¹. Комиссия по атмосферным наукам Всемирной метеорологической организации [2] отметила, что на пути решения проблемы долгосрочного прогноза погоды стоят следующие трудности:

- а) несовершенство физических моделей, которыми описываются атмосферные движения, вследствие неполного представления о физических процессах, происходящих в атмосфере, и в частности процессах генерации, превращения и диссипации всех видов энергии;
- б) несовершенство численных схем решения систем уравнений гидротермодинамики, управляющих атмосферной циркуляцией;
- в) ограниченные возможности используемых сейчас электронных вычислительных машин;
- г) отсутствие достаточной глобальной информации, что не позволяет судить с необходимой точностью о состоянии системы ат-

¹ Термин «деятельный слой подстилающей поверхности» понимается здесь в смысле [1].

мосфера—суша в любой момент времени из-за ограниченных возможностей существующих сейчас средств наблюдения и связи.

Не будет слишком смелым отнести все вышеуказанное и к океану.

Имея в виду, что преодоление этих трудностей возможно только на основе международного сотрудничества, Всемирная метеорологическая организация разработала план создания глобальной системы наблюдений — Всемирной службы погоды [3], а несколько позже Международный совет научных союзов и Всемирная метеорологическая организация приступили к разработке Программы исследования глобальных атмосферных процессов (ПИГАП) [4].

Первым научным проектом ПИГАП должен быть Атлантический тропический эксперимент (АТЭИ), подготовка которого достигла стадии конкретного планирования [5]. Такое предпочтение в плане выполнения ПИГАП проблемам тропической метеорологии не случайное. Дело в том, что в тепловой машине, каковой является атмосфера, нагревателем служит зона между 40° с. ш. и 40° ю. ш. — область, где радиационный баланс системы атмосфера—деятельный слой положителен. Значительную часть этого района занимают тропики. Так, например, по данным [6], поток тепла из тропической зоны к северу через 30° с. ш. равен $1,10 \cdot 10^{15}$ кал/с, что составляет около 4,6% мощности приходящей к земле солнечной энергии и в два с лишним раза больше скорости генерации кинетической энергии по всей атмосфере.

Известно, что атмосфера получает тепло в основном от подстилающей поверхности; при этом около 80% тепловой энергии поступает в виде скрытого тепла конденсации, переносимого водяным паром. По последним оценкам, над океанами около 90% тепла радиационного баланса расходуется на испарение и только 10% на непосредственное нагревание атмосферы через турбулентный теплообмен [6]. В связи с этим значение тропиков становится еще более ясным, поскольку в северном полушарии свыше 80% общей величины испарения Мирового океана приходится на тропические районы Атлантического и Тихого океанов. При этом испарение в поясе $0-10^\circ$ широты — приблизительно в районе расположения внутритропической зоны конвергенции (ВЗК) — составляет около 30%, а в поясе $10-30^\circ$ с. ш. — пассатной зоне — около 54% его общей величины. Те же числа для всего земного шара составляют около 18% для зоны 10° с. ш. — 10° ю. ш. и около 62% для зоны 30° с. ш. — 30° ю. ш. Приведенные цифры являются средними; они дают возможность составить представление о значении тропической зоны как источника энергии для движений атмосферы в целом. Однако они ничего не говорят о механизме, который обеспечивает поступление этой энергии в умеренные широты и превращение ее в кинетическую энергию. В последнее время предложено несколько гипотез о механизме крупномасштабного взаимодействия атмосферы и океана и построены схемы перехода скрытой теплоты, свободного тепла и потенциальной энергии

в кинетическую энергию [1, 7—10]. Не останавливаясь на подробном анализе всех работ, рассмотренных в [1], отметим, что даже в наиболее разработанной схеме [8] остается все-таки неясным, каким образом выделявшаяся при развитии множества кучево-дождевых облаков в экваториальной ложбине скрытая теплота конденсации, которая была запасена в пассатах, превращается в кинетическую энергию атмосферных движений в умеренных широтах.

Одной из главных целей АТЭП является выяснение механизма энергомассообмена между атмосферными движениями в тропиках и умеренных широтах.

Тропическая атмосфера над Атлантическим океаном обладает рядом характерных особенностей. В нижней тропосфере в северном полушарии наблюдается классический северо-восточный пассат, в южном полушарии — юго-восточный пассат, становящийся юго-западным ближе к Африканскому континенту. Область слияния этих течений представляет внутритропическую зону конвергенции, которая летом целиком расположена в северном полушарии и испытывает сезонные миграции от крайне северного положения в августе к крайне южному в январе—феврале. Севернее и южнее ВЗК расположены пассатные максимумы ветра, которые ограничивают область сравнительно слабых ветров в самой ВЗК и связанной с ней экваториальной ложбине. В верхней тропосфере в слое 250—150 мб летом появляется восточное тропическое струйное течение, которое простирается приблизительно вдоль 10° с ш. от Юго-Восточной Азии через остров Шри-Ланка, Аралию, всю Африку к ее западному побережью. От западного перелома умеренных широт северного и южного полушарий экваториальный восточный перенос и тропическое струйное течение отделяются двумя поясами субтропических антициклонов: северным — с центрами над Северо-Западной Африкой, островами Зеленого Мыса и Малыми Антильскими островами и южным — с центром над п. Святой Елены.

Важное значение для процессов обмена между тропиками и умеренными широтами имеют западные субтропические струйные течения, которые опоясывают с севера и юга субтропические антициклоны. При этом в северном полушарии основной обмен массой и моментом количества движения происходит через среднотропическую высотную ложбину, которая образуется между субтропическим антициклоном над западом Атлантики и над Северо-Западной Африкой, протягиваясь с востока-северо-востока на западо-юго-запад от Азорских островов к Центральной Америке. В южном полушарии аналогичную роль играет западноатлантическая высотная ложбина, которая образуется между высотным трением над Южной Америкой и субтропическим антициклоном над п. Святой Елены. Образование этих ложбин обеспечивает динамическое взаимодействие между экваториальным восточным переносом и субтропическими западными струйными течениями северного и южного полушарий. В средней тропосфере по южной периферии африканского субтропического антициклона в июне

возникает среднетропосферное африканское восточное струйное течение на уровне изобарических поверхностей 700—500 мб, которое разрушается в октябре. Наконец, в экваториальной стратосфере наблюдаются попеременно сменяющие друг друга с периодом, приблизительно равным 26 месяцам, восточные и западные течения [11], которые охватывают слой 18—35 км.

Несмотря на кажущуюся простоту и устойчивость тропической циркуляции, особенно в нижних слоях, и действительности в ней непрерывно происходят флуктуации, которые вызываются взаимными различиями различных масштабов — от доли и вышей размером $(2-3) \cdot 10^3$ км до отдельных конвективных ячеек порядка 1—10 км. Эти возмущения образуются как в пассатах, так и в ВЗК. Их длительные существенным образом влияют на условия развития конвекции, а следовательно, на вертикальные потоки количества движения, свободного тепла и водяного пара.

Особенно важны в этом смысле так называемые облачные скопления с горизонтальными размерами порядка 100—1000 км, в которые организуются конвективные облака, дающие большую часть тропических дождей [5]. Совершенно несомненна связь облачных скоплений с системами крупномасштабных полнотных возмущений в экваториальных воздушных течениях. Облачные скопления возникают в областях упорядоченных восходящих токов и разрушаются в областях нисходящих. С другой стороны, сами облачные скопления представляют собой сложные системы организованных в цепочки конвективных облаков более мелкого масштаба, объединенных единым полем растекшихся накоплен. Поэтому важно исследовать также внутреннюю структуру облачных скоплений, оценить вертикальный и горизонтальный перенос тепла, влаги и количества движения, необходимые для создания модели таких скоплений.

Конечной целью АТЭП является создание совершенных трехмерных моделей атмосферной циркуляции с помощью решения физических и динамических уравнений, описывающих последние атмосферу и океан с учетом энергетических процессов, происходящих в тропиках. По необходимости эти модели будут использовать для интегрирования сеть точек, пространственный шаг которой, вероятно, будет не меньше чем 250 км. Таким образом, возмущения, имеющие размеры менее 250 км, неизбежно будут пропущены при численном интегрировании уравнений, а именно они в тропиках вносят большой вклад в перенос тепла, количества движения и водяного пара по вертикали, создают неоднородности поля метеорологических элементов по горизонтали и флуктуации тропической циркуляции.

Отсюда возникает необходимость так называемой параметризации мелкомасштабных процессов через характеристики крупномасштабных движений. В первую очередь должны быть найдены способы параметризации влажной конвекции и пограничного слоя. Влажная конвекция вызывает нагревание атмосферы за счет высвобождения скрытой теплоты конденсации при образовании

кучевых облаков и, таким образом, является важным фактором, который необходимо учитывать в динамике крупномасштабных процессов, поскольку в тропиках поток скрытой теплоты составляет 80—90% всего теплообмена между атмосферой и океаном. Параметризация пограничного слоя означает разработку способов определения вертикальных турбулентных потоков количества движения, тепла и водяного пара через характеристики подстилающей поверхности и измеряемые элементы (ветер, температуру, влажность), характеризующие крупномасштабные особенности метеорологических полей. В программе АТЭП задача параметризации является одной из главных.

Из очень краткого перечисления целей АТЭП видно, что эксперимент задуман как программа изучения атмосферных процессов различного масштаба, которые в тропиках классифицированы следующим образом:

- Масштаб А — масштаб полн размером от 10^3 до 10^4 км, время существования 5 дней и более.
- Масштаб В — масштаб облачных скоплений размером 10^2 — 10^3 км; продолжительность существования 1—5 дней.
- Масштаб С — мезоконвективный масштаб, размер 10 — 10^2 км; характерные жизненные циклы различных типов в зависимости от строения.
- Масштаб D — масштаб конвективных ячеек 1—10 км; характерная продолжительность существования порядка нескольких часов.

Одной из задач АТЭП является исследование взаимодействия атмосферных процессов масштабов А, В, С, D и их роли в формировании погоды в тропиках и умеренных широтах.

Выполнение задач АТЭП возможно при организации наблюдательных систем, охватывающих площади, которые соответствуют масштабам изучаемых явлений. Так, для исследования возмущений в полях ветра, температуры, давления и влажности масштаба А наблюдательная сеть должна быть по крайней мере больше 10^4 км, а расстояние между точками наблюдений меньше 10^2 км. Изучение облачных скоплений потребует создания более густой сети наблюдений с разрешением порядка 150 км и т. д. Эти требования учтены в АТЭП: крупномасштабный полигон включает район тропической зоны, определяемый точками: 24° с. ш., 95° з. д.; 24° с. ш., 70° з. д.; 20° с. ш., 70° з. д.; 20° с. ш., 47° в. д.; 10° ю. ш., 47° в. д.; 10° ю. ш.; 95° з. д. На океанической акватории этого полигона будет размещено 12 зондирующих кораблей. Для исследования внутренней структуры облачных скоплений в Восточной Атлантике на акватории, ограниченной 5—15° с. ш. и 23—30° з. д., будет создан мезометеорологический полигон. Здесь будет расположено 15 зондирующих кораблей. Наблюдательная система должна также включать геостационарные метеорологические спутники, спутники на полярной орбите, а также 9—10 летающих самолетов лабораторий. Сеть станций ВСП на континентах должна ра-

ботать регулярно; предполагается, что план развития станций ВСП в районе проведения АТЭП должен быть завершен к июню 1974 г.

Таким образом, в период проведения АТЭП-74 будет получен такой объем информации о полях метеорологических элементов в тропиках, какой долгое время не будет достигнут на стационарной сети ВСП. Ни одно государство в настоящее время не может надеяться создать подобную наблюдательную сеть самостоятельно. В свете вышесказанного о значении тропических районов для моделирования общей циркуляции атмосферы и усовершенствования методов долгосрочного прогноза погоды совершенно естественно, что Гидрометеорологическая служба, Академия наук и Международной геофизический комитет СССР заявили о своем участии в АТЭП-74 [12]. Это требует серьезной подготовки к АТЭП, с тем чтобы вышлать все наблюдения по согласованной международной программе АТЭП и быть готовым извлечь всю возможную пользу для советской науки из этого уникального мероприятия.

2. Цель и задачи экспедиции

Экспедиция по программе национального Тропического эксперимента 1972 г. (ТРОИЭКС-72) являлась подготовкой к участию Советского Союза в международном Тропическом эксперименте. Перед экспедицией были поставлены две задачи:

- исследование взаимодействия атмосферных процессов четырех масштабов (А, В, С, D) с целью разработки способов параметризации процессов более мелкого масштаба через крупномасштабные характеристики;

- отработка комплексной наблюдательной системы, состоящей из судов, самолета и метеорологических спутников, их совместной работы и взаимодействия; отработка системы получения, сбора, анализа и распространения гидрометеорологической информации в период Тропического эксперимента.

Параллельно с подготовкой к международному Тропическому эксперименту экспедицией проводились исследования в следующих важных научных направлениях:

- численное моделирование атмосферных процессов в тропиках, включая построение физических моделей крупномасштабной циркуляции с учетом параметризации процессов более мелкого масштаба; разработку методов четырехмерного анализа и исследование статистической структуры метеорологических полей;

- исследование процессов взаимодействия и обмена массой, теплом и энергией в тропиках и между тропическими и умеренными широтами, включая оценку горизонтальных потоков тепла, влаги, количества движения, кинетической и потенциальной энергии;

- изучение динамики возникновения и развития атмосферных объектов и связанных с ними облаков и облачных систем, в том числе внутритропической зоны конверсии, волн в восточном

переносе, тропических депрессий, тропических циклонов, струйных течений, 26-месячной цикличности и т. д.;

— исследование взаимодействия океан—атмосфера, включая исследование пограничных слоев в атмосфере и океане, измерение потоков тепла, влаги, количества движения в придном слое, изучение пространственно-временной структуры пограничных слоев, расчет энергетического баланса колонны океан—атмосфера, оценку лагранжевых характеристик масштабов С и D.

Для достижения этих главных целей в экспедиции были организованы научные исследования, испытания новой аппаратуры, методов измерений и обработки, оперативный сбор и анализ гидрометеорологической информации. Собранные в ходе экспедиции обширные информация о полях метеорологических элементов в атмосфере и гидрологических элементов в океане подвергалась научному анализу. Исследования велись в следующих направлениях:

— анализ вертикальной структуры тропической атмосферы и океана по району эксперимента и исследование крупномасштабного взаимодействия тропической циркуляции с циркуляцией умеренных широт;

— оценка порядка величины членов уравнений гидродинамики и термодинамики, а также анализ взаимосвязи между полями давления и ветра в экваториальной тропосфере;

— исследование аэрологической структуры, спектральных характеристик метеорологических элементов во внутритропической зоне конвергенции; оценка масштабов полных возмущений ВЗК и условий их эволюции; вертикальная циркуляция в области ВЗК и пассата;

— определение фазы квазидвухлетней цикличности зональных потоков в экваториальной атмосфере;

— расчет вертикальной циркуляции в области субтропических фронтальных зон и струйных течений, пассатных струйных течений и во внутритропической зоне конвергенции;

— оценка прогностического значения параметров конвекции в тропической Атлантике и разработка способов прогноза конвективных явлений в тропиках;

— исследование эволюции облаков и облачных скоплений в пассатах и во внутритропической зоне конвергенции с применением метеорологических радиолокаторов и спутниковых фотографий; получение сведений о мелкомасштабной структуре конвективной облачности и объективных данных об изменчивости облачного покрова с использованием фотограмметрического метода и фотографирования небесного свода;

— исследование атмосферных возмущений мезометеорологического масштаба, оценка горизонтальных коэффициентов турбулентного обмена и вертикальных токов в подоблачном и облачном слоях методом слежения за баллонами постоянного объема;

— изучение турбулентной структуры приземного слоя атмосферы. Измерение потоков тепла, водяного пара и количества дви-

жения между атмосферой и океаном прямым методом и сопоставление их с результатами расчетов этих величин по средним метеорологическим параметрам;

— получение профилей метеорологических параметров пограничного слоя атмосферы в экваториальной зоне и оценка их пространственной и временной изменчивости;

— определение характеристик атмосферы и морской поверхности по их собственному тепловому излучению в микроволновом (0,8—8,5 см) и инфракрасном (8—15 мкм) диапазонах с целью получения экспериментальных данных о спектре радиационных температур поверхности океана, его зависимости от кинетической температуры подной поверхности и режима волнения, а также данных об излучении атмосферы в условиях тропической зоны океана;

— исследование свойств атмосферных аэрозолей и облачных ядер конденсации в тропической зоне Атлантики;

— измерение всех составляющих радиационного баланса: суммарной и отраженной солнечной радиации, излучения океана и атмосферы, длинноволнового и коротковолнового радиационного баланса, а также специальное исследование режима солнечной и атмосферной радиации в экваториальной зоне, измерение естественной суммарной освещенности горизонтальной поверхности, аэрозольной толщи атмосферы в области 0,3—1 мкм, индикатрис рассеяния света в приводном слое;

— получение сведений о распределении водных масс в Атлантическом океане, их термической и гидрохимической структуре;

— исследование пространственно-временной изменчивости и статистической структуры гидрофизических полей в океане, получение данных о термическом и химическом строении его деятельного слоя, измерение дрейфовых течений и параметров поверхностных вод.

В плане методических работ экспедиции решались следующие задачи:

— оценка действительной точности стандартных метеорологических, аэрологических и гидрологических измерений, производящихся на исследовательских судах;

— отработка методики измерений турбулентных характеристик приводного слоя атмосферы с качающегося основания и методики фильтрации качки судна из показаний датчиков турбулентного измерительного комплекса;

— отработка методики запуска, буксировки на ходу судна и причаливания специализированного метеорологического аэростата, оценка его эксплуатационных качеств применительно к тропической зоне;

— испытание в морских условиях специализированного аэростатного телеметрического измерительного комплекса, отработка методики измерений в различных режимах буксировки и подъема аэростата;

— основные методики исследования возмущений, масштаб которых 10—100 км и 1—10 км, с помощью баллонов постоянного объема (тетронов) в морских условиях;

— изготовление и/или испытание новой измерительной аппаратуры — неконтактного ультразвукового волнографа, морской автоматической регистрирующей станции, зонда-батометра, экспериментальных радиозондов повышенной точности разработка ЦАО, станции для приема спутниковой информации;

— разработка фотограмметрического метода для изучения мелкомасштабной конвективной облачности в горизонтальной плоскости применительно к судовым условиям;

— разработка и ввод в эксплуатацию устройства вывода графической информации из ЭВМ на графический регистратор.

В будущем международном Атлантическом тропическом эксперименте 1974 г. (АТЭП) планируется организовать работу таким образом, чтобы основная гидрометеорологическая информация, которая будет получаться во время эксперимента, передавалась и обрабатывалась в реальном масштабе времени. Учитывая объем ожидаемой информации, это требование АТЭП является очень серьезным. С целью выяснения готовности экспедиции к работе в реальном масштабе времени, а также исходя из необходимости непрерывного анализа хода работ, оперативного планирования и быстрого научного обобщения полученных материалов были поставлены следующие задачи по приему и анализу информации:

— прием цифровой метеорологической, аэрологической, спутниковой информации, факсимильных карт на всех уровнях по району тропического эксперимента и примыкающим территориям;

— прием цифровой метеорологической, аэрологической, гидрологической информации с судов, участвующих в эксперименте;

— составление синоптических карт по району тропического эксперимента, синоптических (крупномасштабных) карт по району расположения судов, построение временных, пространственных и пространственно-временных аэрологических разрезов по данным всех судов, участвующих в эксперименте, построение кривых стратификации по данным аэрологического зондирования всех судов;

— оперативный синоптический анализ по району тропического эксперимента и прогноз погоды для судов, участвующих в эксперименте;

— совместный анализ синоптических и спутниковых данных для оценки макромасштабной эволюции облачных скоплений в зоны конвергенции, анализ мезомасштабной структуры тропической атмосферы в условиях конвекции в зоне конвергенции и эволюции облачных скоплений по данным аэрологических разрезов, спутниковых и радиолокационных наблюдений.

Как видно из этого перечисления, которое по необходимости является неполным, перед экспедицией стояли большие и сложные задачи, выполнение которых могло быть обеспечено только при достаточно четком выполнении программы как стандартных, так и специализированных наблюдений. Значение проведенных в резуль-

тате настоящего эксперимента наблюдений выходит за рамки обобщений, сделанных в экспедиции, и полученные материалы должны быть предметом углубленного научного анализа в ближайшем будущем.

3. Организационная структура экспедиции

В экспедиции приняли участие четыре судна Главного управления гидрометеорологической службы «Профессор Зубов» и «Профессор Визе» (ордена Ленина Арктического и антарктического научно-исследовательского института), «Пассат» и «Муссон» (Управления гидрометеорологической службы Украинской ССР), НИС «Академик Курчатов» (Института океанологии АН СССР), ЭОС «Василий Головин» (Гидрографического управления Министерства обороны СССР). Суда «Академик Курчатов» и «Василий Головин» присоединились к экспедиции на II этапе.

Флагманским кораблем являлось НИС «Профессор Зубов». Структура экспедиции приведена в табл. 1, в которой указан руководящий состав каждого судна, наименование отрядов и отдельных групп, а также их начальники.

Таблица 1

СХЕМА ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЕДИЦИИ ТРОПЭКС-72

Руководство Межведомственной экспедиции ТРОПЭКС-72

Начальник экспедиции — *М. А. Петровский*
 Заместитель начальника экспедиции по судоводждению — *О. В. Андружеский*
 Заместитель начальника экспедиции по океанографии — *Ю. В. Торбева*
 Заместитель начальника экспедиции по связи — *В. А. Косинов*
 Ученый секретарь экспедиции — *П. Д. Азлафов*
 Флагманское судно — НИС «Профессор Зубов»

1. НИС «Профессор Зубов»

Капитан — *О. В. Андружеский*
 Заместитель капитана по науке — *А. А. Лебедев*
 Главный механик — *П. П. Банатов*
 1-й помощник капитана — *В. К. Чирин*

Экспедиционные отряды — начальник отряда:

- 1) метеорологический — *К. А. Мининин*,
- 2) аэрологический — *В. Н. Иванов*,
- 3) океанографический — *Б. Г. Борисов*,
- 4) гидрохимический — *В. Н. Харитонов*,
- 5) следопаратуры — *В. А. Яковарк*,
- 6) спецсвязи — *И. И. Галкина*,
- 7) обработка информации — *М. Г. Кудин*,
- 8) сигнальная группа — *В. С. Чирков*,
- 9) группа изучения пограничного слоя — *В. Н. Иванов*.

2. НИС «Профессор Визе»

Капитан — *А. А. Сейдбаев*
 Заместитель капитана по науке — *И. Д. Зинин*

В. Н. Иванов

**ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, СТРУКТУРА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ
ИТОГИ ЭКСПЕДИЦИИ «ТАЙФУН-75»**
(25 июля—5 ноября 1975 г.)

Введение

С 25 июля по 5 ноября 1975 г. в северо-западной части экваториальной зоны Тихого океана была проведена экспедиция при участии пяти научно-исследовательских судов ГУГМС: НИС «Академик Королев» (флагман), НИСП «Океан», «Волна», «Прилив» и «Прибой».

В экспедиции принимали участие учреждения Гидрометслужбы: Институт экспериментальной метеорологии (ИЭМ) и Дальневосточный научно-исследовательский гидрометеорологический институт (ДВНИГМИ) (ответственные за научную программу), Главная геофизическая обсерватория имени А. И. Воейкова (ГГО), Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО), Государственный океанографический институт (ГОИН), а также учреждения Министерства высшего образования СССР: Ленинградский гидрометеорологический институт (ЛГМИ), Харьковский институт радиозлектроники (ХИРЭ), Казанский авиационный институт (КАИ).

1. Цель исследований

Экспедиция «Тайфун-75» в экваториальную зону Тихого океана ставила своей основной целью изучение некоторых явлений в тропической атмосфере и океане, связанных с тайфунами, их возникновением, эволюцией и взаимодействием с деятельным слоем океана. С точки зрения классификации состояний атмосферы, принятой в программах международного эксперимента АТЭП (1974, Тропическая Атлантика) [19], экспедиция была нацелена на изучение «возмущенных» состояний тропической атмосферы, эти состояния, как известно, менее изучены и характеризуются более интенсивными процессами энерго- и массообмена. В этом смысле ее результаты

дополняют исследования, выполненные во время экспедиций ТРОПЭКС-72 [10] и ТРОПЭКС-74 [11], а также некоторых других [15].

Научная программа экспедиции состояла из трех частей:

- а) синоптической,
- б) гидрологической и
- в) исследований пограничного слоя атмосферы.

Каждый из этих разделов представляет собой отдельную подпрограмму.

1.1. Научные задачи подпрограммы синоптических исследований

Для разработки прогнозов возникновения и эволюции тропических циклонов крайне важно изучать влияние синоптических условий на механизмы взаимодействия циклонов с подстилающей поверхностью, их энергоснабжение. Следует отметить, что процессы энергоснабжения атмосферы в тропической зоне изучены явно недостаточно не только в районах действия ураганов, но и при невозмущенных условиях. Не выяснен вопрос, насколько «непроницаемыми» для вертикальных потоков различных субстанций являются задерживающие слои (инверсии, изотермии), которые регулярно наблюдаются не только в пассатной зоне, но и в ВЭК, т. е. в районах возникновения и перемещения ураганов (тайфунов).

Мало изучен механизм взаимодействия тропических циклонов с окружающей циркуляционной системой атмосферы и поверхностью океана. Это взаимодействие в ряде случаев приводит к резкому изменению траекторий движения тропических циклонов.

Перечисленные выше вопросы легли в основу научных задач синоптических исследований, которые сформулированы ниже:

- 1) изучение составляющих энергетического баланса для тропосферы в следе тайфуна в районах облачных скоплений, в пассатной зоне. Исследование взаимосвязи составляющих баланса с волновыми возмущениями тропической тропосферы;
- 2) изучение пространственно-временной изменчивости параметров задерживающих слоев тропосферы над Тихим океаном;
- 3) определение основных характеристик поля тропической атмосферы над Тихим океаном. Изучение взаимосвязи волновых движений с облачными образованиями;
- 4) исследование сил, оказывающих влияние на перемещение тайфунов;
- 5) измерение вертикальных скоростей в конвективных облаках тропической зоны с использованием шаров нейтральной плавучести;
- 6) исследование влияния синоптических условий на движение тайфунов по неправильным траекториям;
- 7) исследование взаимосвязи тропических депрессий и тайфунов с атмосферной циркуляцией в тропических широтах и в особенности с внутритропической зоной конвергенции. Исследование вертикальной структуры атмосферы на периферии тайфунов.

1.2. Научные задачи подпрограммы гидрологических исследований

Одним из важных условий возникновения тропических циклонов является повышенная температура поверхностного слоя океана (не ниже 26—27°C). Интенсификация тропической депрессии и развитие ее в тайфун происходят за счет энергии, отдаваемой нагретой поверхностью океана в атмосферу. Это приводит к охлаждению поверхности океана в районах прохождения тропических циклонов.

Охлаждение поверхностного слоя океана определяется следующими факторами:

- поглощением тепла (скрытого и явного) тайфуном на поверхностного слоя за счет турбулентного обмена;
- перемешиванием по вертикали верхнего квадранодного слоя ураганным ветром и волнением;
- вертикальным подъемом (апвеллинг) вод под центральной частью тайфуна;
- опусканием вод за пределами области ураганных ветров по краям полосы апвеллинга, вызывающим заглублиение термоклина (даунвеллинг).

Представляется, что по пространственно-временной изменчивости стратификации поверхностных вод океана в следе урагана (тайфуна) можно уточнить механизм его энергоснабжения и оценить количество энергии, получаемой ураганом.

Исходя из изложенного выше, гидрологическая подпрограмма содержала следующие научные задачи:

1) исследование пространственно-временной структуры поверхностного слоя океана в следе тайфуна, т. е.:

- изучение гидрологических характеристик деятельного слоя океана до глубины 500 м до и после прохождения тайфуна;
- изучение закономерностей распределения в пространстве зон апвеллинга и даунвеллинга и их связи с траекторией, скоростью перемещения и энергией тайфуна;
- оценка времени существования возмущенной стратификации вод в следе тайфуна;
- определение основных характеристик бароклинных волн деятельного слоя океана и их зависимости от скорости перемещения и энергии тайфуна;

2) оценка интенсивности теплообмена тайфуна с поверхностью океана, т. е.:

- определение суточных потерь тепла поверхностным слоем океана и их пространственного распределения в зоне прохождения тайфуна;

3) исследование изменчивости теплосодержания вод и факторов, ее определяющих, в различных синоптических условиях;

4) выявление связей, существующих между площадью района зарождения тайфунов и запасом тепла однородного слоя океана.

1.3. Научные задачи подпрограммы изучения пограничного слоя атмосферы

Цель исследования — получить количественные данные, позволяющие оценить энергообмен между океаном и атмосферой в районах зарождения тропических циклонов и в районах, подверженных их действию, а также изучить взаимодействие тропических циклонов с океаном и окружающей средой. С целью выявления особенностей механизма обмена в возмущенных условиях при большой скорости ветра ставились задачи исследования брызгообмена, а также по оценкам площади океана, покрытой пеной и барашками.

Другой целью этого раздела является изучение структуры пограничного слоя атмосферы в тропических широтах над океаном. Данные, в особенности по профилям потоков тепла, влаги и количества движения, могут быть использованы для проверки существующих и создания новых математических моделей, описывающих пограничный слой в тропической зоне.

Основные задачи этой подпрограммы формулировались следующим образом:

1) изучение интенсивности турбулентного обмена между атмосферой и океаном, т. е.:

- в зоне вероятного зарождения тайфуна и на его периферии;
- в следе тайфуна;

2) изучение особенностей тепло- и массообмена между атмосферой и океаном, в том числе в возмущенных условиях (уточнение схем параметризации приподнятого слоя), т. е.:

- изучение зависимости тепло- и массообмена от температуры морской поверхности;
- изучение особенностей механизма взаимодействия океан—атмосфера посредством брызг и морской пены;
- изучение зависимости коэффициентов тепло- и массообмена от скорости ветра в штормовых условиях;
- изучение температурного режима тонких приповерхностных слоев воды в воздухе;

3) изучение структуры пограничного слоя атмосферы, т. е.:

- исследование влияния горизонтальной неоднородности полей температуры на профили метеорологических параметров;
- изучение пространственно-временной изменчивости турбулентных характеристик метеоэлементов в подоблачном слое и между облаками и их связи с толщиной переходного слоя;
- изучение временной изменчивости профилей средних метеорологических параметров и турбулентных потоков тепла, влаги, диссипации кинетической энергии турбулентности.

2. Наблюдательные средства и измерительные системы

Наблюдательные средства и измерительные системы, которыми были оборудованы суда экспедиции «Тайфун-75», состояли из стандартных и специализированных. Их краткое описание дается ниже.

2.1. Комплекс стандартных наблюдений

Метеорологические наблюдения проводились по программе, стандартной для НИС и НИСП ГУГМС. На измерительных полетах проводились ежедневные наблюдения.

Аэрологическое зондирование проводилось, как правило, до уровней 50 и 10 мбар при работах в районе экватора. На полетах зондирование производилось в 00, 06, 12 и 18 GMT, а в период интенсивных наблюдений в сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 22 GMT. Применялся радиозонд РКЗ-2.

Гидрологические наблюдения — зондирование батитермографом, гидрохимические измерения, гидрологические станции, гидрологические работы — велись на разрезах. Частота и объем гидрологических наблюдений определялись программой эксперимента. На гидрологических разрезах выполнялись стандартные гидрологические станции через 10 миль, где наблюдения за температурой и солесностью воды велись на стандартных горизонтах 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400 и 500 м.

Актинометрические наблюдения включали измерения прямой, суммарной, отраженной, рассеянной радиации и радиационного баланса.

Радиолокационные наблюдения производились с помощью метеорологической станции АРС-3. Определялось пространственно-временное распределение облачности, выделялись области крупнокапельной части облаков. Измерения выполнялись в зависимости от ситуации.

Прием данных с ИСЗ об облачном покрове в видимом и инфракрасном диапазоне спектра производился в течение всего периода наблюдений.

2.2. Комплекс специализированных наблюдений

Помимо стандартных наблюдений, на судах проводились специализированные наблюдения с помощью комплексов аппаратуры, разработанных в научно-исследовательских институтах ГУГМС и других ведомств. Ниже приводится их краткое описание.

Турбулентный измерительный комплекс. Специальные измерения для исследования пограничного слоя атмосферы проводились на флагманском НИС «Академик Королев» при помощи турбулентного измерительного комплекса, разработанного в ИЭМ [6]. Комплекс предназначался для измерения турбулентных характеристик атмосферы в приземном слое с движущегося судна.

Комплекс включает (см. рис. 1):

- 1) датчики для измерения метеорологических элементов (акустический анемометр, пульсационный термометр и датчик влажности);
- 2) датчики для измерения параметра собственных движений измерительной платформы, связанных с качанием судна;
- 3) регистрирующую аппаратуру, включающую в себя многоканальную систему регистрации на магнитной ленте в цифровом коде

и 5-канальный малоинерционный самописец для визуальной оценки качества работы измерительного комплекса. Система регистрации на магнитную ленту [13] позволяла регистрировать и вводить данные в ЭВМ «Минск-22».

Аэростатное зондирование пограничного слоя атмосферы. Аэростатные измерения проводились на НИС «Академик Королев». Аэростатный измерительный комплекс, разработанный в ИЭМ, включает в себя аэростат змеиного типа объемом 40 м^3 и максимальной высотой подъема 1200 м, оборудование для подъема и спуска, зонд с датчиками и передающей радиотелеметрической аппаратурой, приемную аппаратуру, регистрирующую данные на перфоленту. С помощью комплекса измерялись: модуль скорости ветра ($5-20 \pm 0,25 \text{ м/с}$), вертикальная компонента скорости ветра



Рис. 1. Общий вид турбулентного измерительного комплекса.

($0,1-8 \pm 0,1 \text{ м/с}$); температура воздуха ($15-35 \pm 0,1^\circ\text{C}$); относительная влажность ($30-100 \pm 3\%$); давление ($900-1050 \pm 0,5 \text{ мбар}$).

Аэростатный комплекс также позволяет производить измерения турбулентных характеристик пограничного слоя атмосферы: турбулентных потоков тепла, влаги и количества движения, структурных параметров турбулентных вихрей.

Контейнер аэростата представлен на рис. 2.

Специальная аппаратура для исследования микровзаимодействия океана и атмосферы. Для специальных измерений с целью исследования микровзаимодействия океана и атмосферы группой ГГО на НИСП «Океан» использовалась следующая аппаратура:

а) аппаратура для измерений температуры и влажности воздуха: психрометры с электровелирацией, термометрами сопротивления. Разрешающая способность системы около $0,05^\circ\text{C}$;

б) установка Р. С. Бортковского для измерения поля брызг над взволнованной морской поверхностью. Она позволяет исследовать вертикальный лоток и распределение по размерам брызг радиусом от 50 до 1000 мкм. Устойчивое положение прибора на волне отмечалось при скорости ветра 24 м/с;

в) обычные фотоаппараты «Зенит» для фотографирования морской поверхности с целью определения относительной площади, занятой барашками и пеной.

На НИС «Академик Королев» группа ИЭМ использовала следующую аппаратуру:

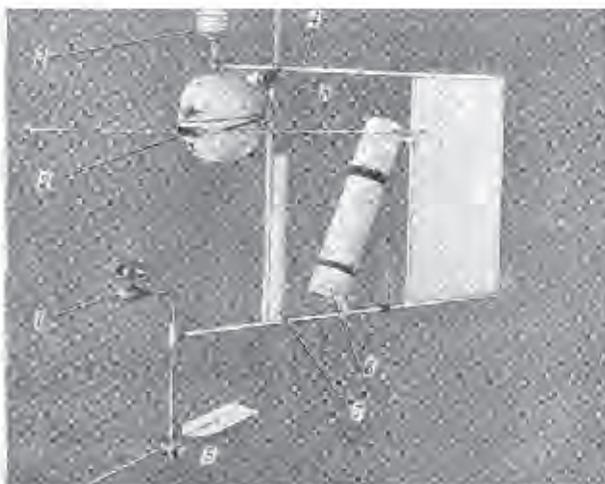


Рис. 2. Подвизуемый контейнер.

1 — датчик малой скорости ветра; 2 — радиолокаметрический контейнер; 3 — датчики температуры и влажности; 4 — рама; 5 — датчик угла наклона троса и рамы; 6 — датчик скорости горизонтальной составляющей ветра; 7 — датчики выталки; 8 — датчик угла вертикальной составляющей скорости ветра.

г) выдающий зонд (разработка ИЭМ), предназначенный для измерения профилей температуры, влажности и скорости ветра в 50 сантиметровой слое атмосферы над водной поверхностью. Зонд оснащен малоинерционным термометром, малоинерционным датчиком влажности, датчиком скорости ветра.

д) градиентограф «вода—воздух» (разработка ИЭМ), состоящий из поплавка, на котором укреплены два одинаковых термистора. Термистор, находящийся в воде, расположен в 3 см, а находящийся в воздухе — в 8 см от границы раздела вода—воздух.

Акустическое зондирование. При исследовании пограничного слоя атмосферы применялась также аппаратура для дистанционного акустического зондирования, разработанная в ХИРЭ.

Применяемый для этих целей акустический локавтор отличается от ранее разработанных тем, что в качестве зондирующего сигнала используется короткий акустический видеимпульс длительностью 60—100 мкс, генерируемый электроакустическим преобразователем плазмменного типа.

Уравновешенные баллоны (тетроны). Для исследования вертикальных скоростей воздуха и перемешивания в облаках использовались баллоны нейтральной плавучести (тетроны) (разработка ИЭМ). Объем от 0,2 до 0,5 м³, высота подъема до 4000 м; координаты тетронов прослеживались до 100 км. Тетроны были оборудованы радиозондом, имели активный ответчик. При проведении работ использовался судовой локавтор «Метеорит».

Аппаратура для непрерывной регистрации температуры воды на 10 горизонтах на ходу судна. Специальные измерения для исследования структуры слоя перемешивания океана проводились на НИСП «Волна» группой ЛГМИ при помощи 10-канальной буксируемой измерительной системы непрерывной регистрации температуры воды в океане («термотрала») [8]. Термотрал представляет собой кабель с вваренными в него десятью отрезками для подключения датчиков температуры. На конце термотрала имеется датчик давления для контроля глубины.

Буксирование термотрала осуществлялось с помощью троса с грузом весом 300 кг на конце и при скорости движения судна не более 4 узлов.

3. Наблюдательные полигоны

Для решения научных задач, сформулированных выше (см. разд. I), были выбраны определенные районы исследований, измерения в которых проводились в течение четырех этапов экспедиции. Ниже дается более подробное описание этих этапов и приводятся координаты расположения судов.

Этап 1. Полигон в форме треугольника, предназначенный для синоптических исследований (рис. 3). Время работы на полигоне — с 29 июля по 1 августа 1975 г.

Координаты судов:

НИСП «Прилив» — 30° 00' с. ш., 131° 30' в. д.

НИСП «Океан» — 28° 30' с. ш., 130° 00' в. д.

НИСП «Волна» — 28° 30' с. ш., 133° 00' в. д.

Подвижный гидрологический полигон, предназначенный для изучения влияния тропических циклонов на структуру деятельного слоя океана, ограниченный 13—22° с. ш., 131—135° 00' в. д. (1—9 августа).

Полигон в форме ромба, предназначенный для синоптических исследований, ограниченный 12—15° с. ш., 132° 30'—135° 30' в. д. Время работы на полигоне — с 10 по 14 августа. Затем все суда, не меняя своего расположения относительно друг друга, двигались вдоль ВЗК (подвижный синоптический полигон) в Южно-Китайское море через пролив Бабуя. В Южно-Китайское море, по пути

следования в порт Сингапур, суда занимали позицию в форме ромба. Расстояние между позициями судов на полигоне по диагонали составляет $1^{\circ}30'$.

Этап II. После перехода из порта Сингапур до пролива Бабуян суда были построены в форме ромба на подвижном полигоне, предназначенном для синоптических исследований (рис. 4).

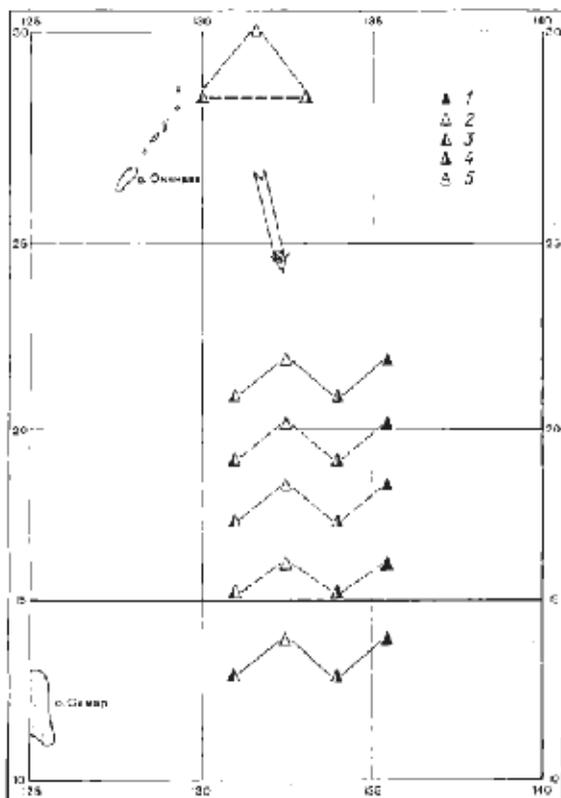


Рис. 3. Синоптический и подвижный гидрологический полигоны.

1 — НИС «Академик Королев», 2 — НИСП «Прилив», 3 — НИСП «Океан», 4 — НИСП «Волна», 5 — НИСП «Прибой».

Координаты судов:

НИС «Академик Королев»	— $18^{\circ}00'$ с. ш., $124^{\circ}00'$ в. д.
НИСП «Океан»	— $19^{\circ}30'$ с. ш., $122^{\circ}30'$ в. д.
НИСП «Прибой»	— $19^{\circ}30'$ с. ш., $124^{\circ}00'$ в. д.
НИСП «Прилив»	— $21^{\circ}00'$ с. ш., $124^{\circ}00'$ в. д.
НИСП «Волна»	— $19^{\circ}30'$ с. ш., $125^{\circ}30'$ в. д.

1. Продукты ядерных взрывов в атмосфере и их выпадение на почву

С. Г. МАЛАХОВ, А. Н. СИЛАНТЬЕВ, Ц. И. БОБОВНИКОВА,
В. Ф. БРЕНДАКОВ, К. П. МАХОНЬКО, Т. В. ПОЛЯКОВА,
А. А. САВЧЕНКОВА, В. Н. ЧУРКИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГЛОБАЛЬНЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ НА ТЕРРИТОРИИ СССР В 1963—1967 гг.

(Союз Советских Социалистических Республик)

1. Долгоживущие радиоактивные продукты деления в приземном слое атмосферы

Среднемесячные концентрации суммарной β -активности продуктов деления Mn^{54} , Ce^{144} , Cs^{137} , осредненные по территории Советского Союза (40° – 70° с. ш.) за период с 1963 по конец 1967 г., представлены в табл. 1. Концентрации приведены к середине периода отбора проб. Из табл. 1 следует, что концентрации долгоживущих продуктов деления в приземном слое атмосферы за период с 1963 по 1967 г. неуклонно уменьшались. Так, максимальные среднемесячные концентрации Ce^{144} уменьшились в 1967 г. по сравнению с 1963 г. в 400 раз, Cs^{137} в 10 раз и т.д. Поскольку Cs^{137} имеет большой период полураспада, по изменению его концентрации в приземном слое атмосферы можно судить о скорости очищения стратосферы от долгоживущих продуктов деления, если предположить, что в среднем концентрации этого изотона у поверхности земли пропорциональны его запасам в стратосфере.

На рис. 1 приведено уменьшение среднегодовых концентраций Cs^{137} с 1963 по 1967 г., осредненных на территории СССР. Для сравнения на том же рисунке указаны среднегодовые концентрации Ce^{144} . Последние исправлены на распад и приведены к середине 1963 г. При этом по оси ординат отложен логарифм концентрации, выраженный в произвольных относительных единицах, по оси абсцисс — время.

Простейший анализ рис. 1 показывает, что уменьшение среднегодовых концентраций Cs^{137} и Ce^{144} в течение 1963—1967 гг. можно приблизительно описать экспонентой с периодом полуудаления из стратосферы, равным $T_{1/2} = 11$ мес. для Ce^{144} и $T_{1/2} = 10$ мес. для Cs^{137} . Подобные оценки для Sr^{90} дают величину $T_{1/2} = 12$ мес.

Из рассмотрения этих данных следует, что в течение 1963—1967 гг. вследствие незначительности новых поступлений продуктов взрывов в атмосферу установилась примерно постоянная скорость очищения стратосферного резервуара от долгоживущих продуктов ядерных взрывов Cs^{137} и Sr^{90} от серии 1961—1962 гг. При этом каждый год запас этих изотопов в стратосфере северного полушария уменьшается примерно вдвое.

Таблица 1

Среднемесячные концентрации (10^{-11} кюри/м³) суммарной β -активности в отдельных долгоживущих продуктах ядерных взрывов в 1963—1966 гг. в приземном слое атмосферы (в среднем по СССР)

Изотоп	Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Сумма β -активных продуктов	1963	420	540	550	1570	2177	(170)	(200)	710	440	170	90	80
	1964	50	70	80	80	110	120	70	45	20	22	17	8
	1965	10,2	7,3	10,2	12,5	11,5	27,7	15,3	8,2	5,8	3,2	2,4	2,7
	1966	2,5	2,7	2,9	4,0	5,8	8,8	6,4	3,4	2,5	1,3	1,2	1,0
	1967	8,3	7,7	5,5	5,3	3,8	3,0	2,0	2,3	2,0	2,0	2,4	2,0
Cs^{137}	1963	23	38	55	183	201	103	128	96	64	28	22	19
	1964	20	14	25	27	33	30	23	13	9	6	1,4	2,7
	1965	3,1	3,3	3,8	3,8	4,5	5,0	3,7	1,9	1,4	0,7	0,5	0,5
	1966	0,5	0,6	0,8	0,9	0,9	1,0	0,7	0,4	0,2	0,1	0,23	0,21
	1967	0,29	0,32	0,39	0,39	0,35	0,21	0,13	0,12	0,170	0,25	0,23	0,28
Sr^{90}	1964		3,0			1,2							
	1965	1,9	1,4	3,1	3,7	5,2	4,0	2,6	1,6	0,7	1,0	0,6	0,7
	1966	0,7	0,9	1,0	1,2	1,2	1,6	1,4	0,8	0,8	0,5	0,2	0,2
	1966	0,3	0,3	0,5	0,6	0,7	0,7	0,6	0,4	0,2	0,14	0,17	0,2
	1967	0,22	0,19	0,20	0,26	0,33	0,24	0,18	0,13	0,1	0,06	0,06	0,06
Mn^{54}	1964	5,0	1,6	2,3	3,0	4,3	4,0	3,0	1,4	1,0	0,3	0,4	0,3
	1965	0,3	0,32	0,35	0,35	0,5	0,3	0,25	0,15	0,1	0,05	0,05	0,04
	1966	0,06	0,06	0,09	0,06	0,1	0,04	0,06	0,05	0,03	0,03	0,03	
Sr^{90}	1965*		0,7			0,9			0,3			0,3	
	1966*		0,3			0,4			0,3			0,1	
	1967*		0,16			0,18			0,12			0,04	

* Среднеазиатские концентрации.

Отметим, что в работе (11) период полуумножения количества Sr^{90} в стратосфере в северном полушарии, оцененный по данным непосредственных измерений в стратосфере, в среднем за период с 1963 по 1965 г. был равен примерно 10 месяцам.

При рассмотрении рис. 1 обращает на себя внимание поведение Cs^{137} . В 1967 г. не наблюдалось уменьшения среднегодовой концентрации этого изотопа по сравнению с 1966 г. Наоборот, произошло даже некоторое ее увеличение. Объясняется это тем обстоя-

ятельством, что в декабре 1966 г. и в июне 1967 г. в атмосфере северного полушария были проведены взрывы сравнительно мощных ядерных бомб [12, 13]. Это и привело к заметному увеличению содержания Ce^{137} в атмосфере.

В течение всех лет начиная с 1963 до 1967 г. отмечался весенний максимум концентраций долгоживущих продуктов ядерных паров в приземном слое атмосферы. В настоящей работе мы сделали попытку сравнить сезонные колебания концентраций за отдельные годы, т. е. определить, с одной стороны, устойчивость этих сезонных коле-

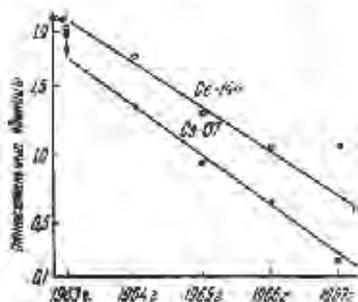


Рис. 1. Уменьшение среднегодовых концентраций Cs^{137} и Ce^{144} в период с 1963 по 1967 г. (в среднем по СССР).

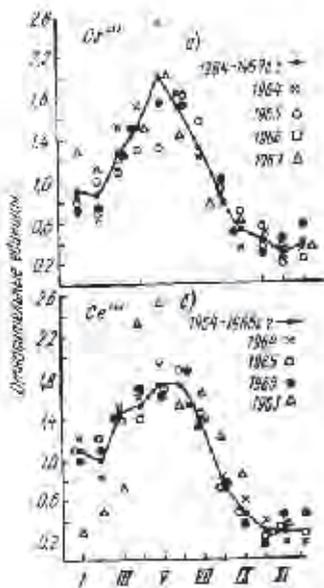


Рис. 2. Сезонный ход изменений концентраций Cs^{137} и Ce^{144} в 1965—1967 гг. в среднем по стране в относительных единицах (приземный слой атмосферы).

баний и, с другой — степень их изменчивости год от года. Рассматривались концентрации Cs^{137} и Ce^{144} . В первом случае использовались данные за период с 1963 по 1967 г., во втором случае 1967 г. не рассматривался. Это объясняется тем, что Cs^{137} является долгоживущим изотопом, на уровни концентраций которого в атмосфере ядерные взрывы, проведенные в северном полушарии после 1962 г., не оказали существенного влияния, чего нельзя сказать о концентрации Ce^{144} в приземном слое воздуха в 1967 г. Поэтому результаты измерений Ce^{144} в 1967 г. не рассматривались. Все среднемесячные концентрации каждого изотопа в каждом году делились на соответствующую среднегодовую концентрацию. Таким образом, использовались данные, выраженные в относитель-

ных единицах — в долях среднегодовой концентрации. Результаты приведены на рис. 2. Величина среднемесячных концентраций осредненная за несколько лет, определялась в виде арифметической средней за соответствующие месяцы лет.

Рис. 2 показывает, что среднемесячные концентрации Cs^{137} в каждом отдельном году, будучи выражены в отмеченных выше относительных единицах, мало отличаются от значений среднемесячных концентраций, осредненных за соответствующие месяцы всех рассматриваемых лет. Различия в большинстве случаев не превышает 20% и лишь в отдельные месяцы отдельных лет они достигают 30% и больше. Наибольшие различия по концентрациям Cs^{137} отмечались в 1965 г., когда весенний максимум приходился на июнь, а концентрации в мае были в 1,5 раза меньше, чем в среднем за весь период с 1964 по 1967 г. (в относительных единицах).

После прохождения весеннего максимума концентрации Cs^{137} уменьшались обратно пропорционально времени и примерно вдвое за каждые 2,5 месяца вплоть до конца осени. Сезонные колебания концентраций Cs^{137} мало отличаются от соответствующих колебаний концентрации Ce^{144} . Некоторые различия в высоте весеннего максимума можно отнести за счет радиоактивного распада этого изотопа. Кроме того, данные по концентрации Ce^{144} в первой половине 1963 г. резко отличаются от соответствующих значений, осредненных за 1964—1966 гг. Возможно, это связано с близостью во времени к серии ядерных взрывов конца 1962 г.

Таким образом, приведенные нами данные говорят о большой стабильности сезонных колебаний концентраций продуктов ядерных взрывов в приземном слое атмосферы и в случае осреднения данных этих колебаний по большой территории.

В табл. 1 и на рис. 1 и 2 мы имели дело со средними концентрациями продуктов ядерных взрывов в приземном слое атмосферы, осредненными по территории СССР. Максимальные уровни среднемесячных концентраций глобальных радиоактивных продуктов деления в отдельных пунктах СССР отличаются от среднего значения во стране не более чем в 2—3 раза.

2. Короткоживущие продукты деления в приземном слое атмосферы

Специально исследовалось изменение во времени отношений активностей различных пар изотопов, присутствующих в приземном слое атмосферы. На рис. 3 приведены изменения отношения активностей Ce^{144}/Cs^{137} и Ce^{144}/Mn^{54} за период с 1964 по 1967 г. На графике, построенном в логарифмическом масштабе, экспериментальные точки Ce^{144} и Cs^{137} хорошо укладываются на прямую, соответствующую радиоактивному распаду Ce^{144} . Эффективная дата образования осколков деления — декабрь 1962 г. Кроме того, отчетливо отмечается два существенных повышения уровней отно-

шения Ce^{144}/Cs^{137} в начале и в конце 1967 г. Эти повышения соответствуют приходу «свежих» осколков деления от новых ядерных взрывов, имевших место в северном полушарии в декабре 1966 г. и в июне 1967 г. [12]. В оба эти периода в приземном слое атмосферы были обнаружены свежие короткоживущие продукты деления такие, как Ce^{144} и $Zr^{95}+Nb^{95}$. На рис. 4 и 5 представлены вре-

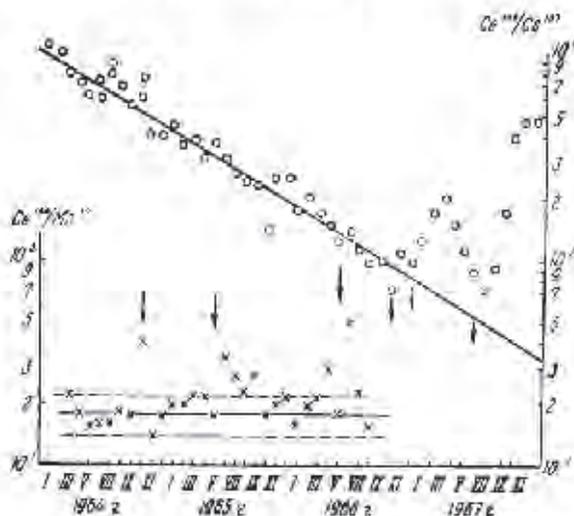


Рис. 3 Отношения активностей Ce^{144}/Mn^{54} и Ce^{144}/Cs^{137} в приземном слое воздуха в среднем по СССР. Стрелками указаны даты испытаний в северном полушарии

менные колебания отношений активностей Ce^{144} к Cs^{137} и к $Zr^{95}+Nb^{95}$. Максимумы указанных отношений, так же как и максимумы отношения активностей Ce^{144}/Mn^{54} , указывают на появление свежих короткоживущих нуклидов от ядерных взрывов, которые проводились в северном полушарии в это время [12, 13].

Еще один интересный факт можно отметить из рис. 3. Величина отношения Ce^{144}/Cs^{137} после достижения максимума в марте-апреле 1967 г. начинает затем быстро уменьшаться, гораздо быстрее, чем можно было бы ожидать, судя по радиоактивному распаду Ce^{144} . Это означает, что свежие продукты деления, появившиеся в атмосфере в это время, во-первых, полностью не перемешались в атмосфере со старыми продуктами деления, во-вторых, она гораздо быстрее выводилась из атмосферы, чем старые продукты деления. Это может иметь существенное познавательное значение для изучения распространения примесей в атмосфере, поскольку в отличие от ядерных испытаний серия 1961—1962 гг.

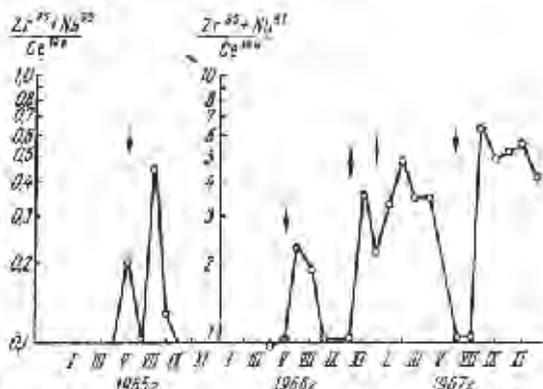


Рис. 4. Колебания отношений активностей $(Zr^{95} + Nb^{95})/Ce^{144}$ в приземном слое воздуха в 1955—1967 гг.

Горизонтальные удары и стрелы указывают на взрывы ядерных зарядов.

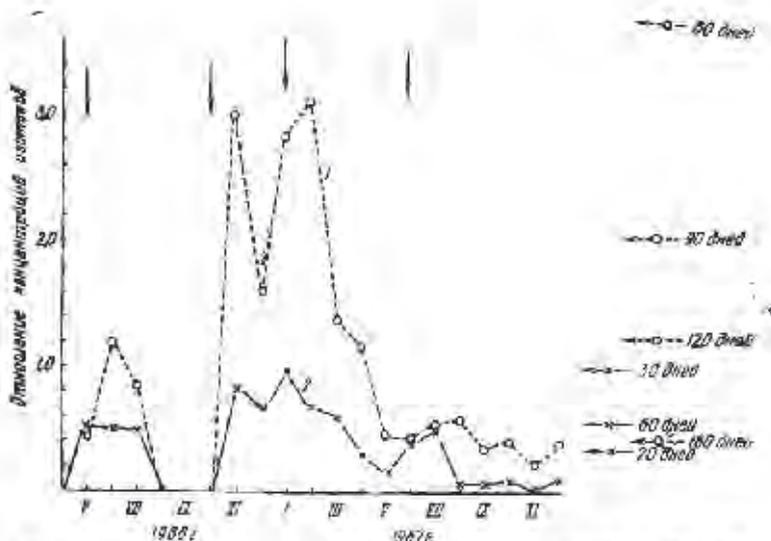


Рис. 5. Отношения активностей Ce^{144}/Ce^{144} (1) и $Ce^{144}/(Zr^{95} + Nb^{95})$ (2) в приземном слое воздуха в 1966—1967 гг.

Вертикальные стрелки указывают время взрыва ядерных зарядов в атмосфере. Горизонтальные стрелки указывают на отношения активностей соответствующих радиоизотопов в этот период времени.

ядерные взрывы в 1966 и 1967 гг. проводились в умеренных широтах северного полушария и выбрасывали радиоактивные вещества на широте струйного течения. Правда, не нужно забывать, что скорость выпадения радиоактивных аэрозолей зависит от того,

Таблица 2

Средние по СССР среднемесячные концентрации (10^{-14} кюри/м³) в приземном слое воздуха Ce^{144} и $Zr^{95} + Nb^{95}$

Год	Изотоп	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1966	Ce^{144}	—	—	—	—	0,7	1,2	0,6	—	—	—	0,7	0,34
	$Zr^{95} + Nb^{95}$	—	—	—	—	0,8	2,5	1,2	0,4	0,2	0,1	0,8	0,46
1967	Ce^{144}	0,82	1,0	0,53	0,44	0,17	0,09	0,02	0,07	0,06	0,04	0,03	0,02
	$Zr^{95} + Nb^{95}$	0,94	1,45	1,38	1,37	0,67	0,2	0,13	0,75	0,63	1,27	1,25	1,17

какая часть продуктов деления попала в результате взрыва в стратосферу, какая — в тропосферу. Это осложняет анализ и для получения каких-либо определенных выводов необходимы дальнейшие исследования.

Для более полной информации о свежих продуктах деления в атмосфере в табл. 2 приведены средние по территории СССР концентрации в приземном слое воздуха Ce^{144} и $Zr^{95} + Nb^{95}$ в 1966 и 1967 гг.

Заметим, что среднемесячные концентрации указанных в табл. 2 короткоживущих продуктов деления в приземном слое атмосферы в среднем по стране в 1967 г. были примерно на два порядка ниже, чем соответствующие концентрации осенью 1961 и 1962 г. в период интенсивного проведения серии мощных термоядерных взрывов [4, 5].

Характеристики скорости удаления короткоживущих $Zr^{95} + Nb^{95}$ из атмосферы приведены на рис. 6. На графике построено в логарифмическом масшта-

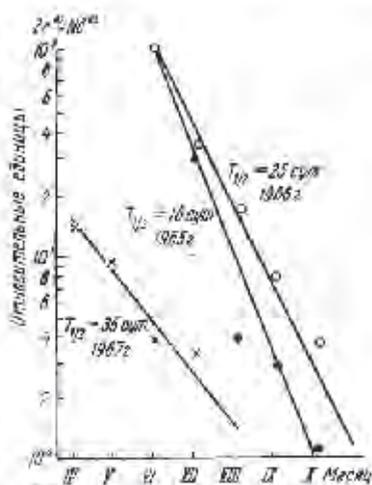


Рис. 6. Относительное уменьшение концентрации $Zr^{95} + Nb^{95}$ в приземной атмосфере в среднем по СССР (исправлено на распад).

бо, показано уменьшение среднемесячных концентраций этих изотопов в приземном слое атмосферы после прохождения максимальных уровней концентрации в 1965, 1966 и 1967 гг.

При этом делалась поправка на радиоактивный распад $Zr^{95} + Nb^{95}$. Концентрации на рис. 6 выражены в относительных единицах. При анализе приведенных данных предполагалось, что приземные концентрации $Zr^{95} + Nb^{95}$ пропорциональны запасам этих изотопов в атмосфере. Оказалось, что период полувыведения указанных изотопов из атмосферы в 1965 г. был близок к оценкам скорости удаления аэрозолей из тропосферы [3]. При рассмотрении данных за 1966 г. и особенно за 1967 г. следует думать, что некоторая часть $Zr^{95} + Nb^{95}$ выпала в этих случаях из верхних слоев атмосферы, в результате чего период полувыведения этих изотопов из атмосферы оказался выше, чем в 1965 г.

3. Радиоактивные выпадения долгоживущих изотопов на поверхность земли

Данные об уровнях выпадений долгоживущих радиоактивных изотопов из атмосферы в среднем по СССР за период с 1963 по 1967 г. представлены в табл. 3.

Таблица 3

Выпадения долгоживущих продуктов ядерных взрывов (микюри/км² квартал) на поверхность земли в среднем по СССР с 1963—1966 гг.

Год	Экста-та	Радио		
		С-90	Са ¹³⁷	Мп ⁴
1963	I	1,5		
	II	4,5		
	III	4,2		
	IV	1,0		
1964	I	0,6	1,4	1,8
	II	3,0	3,9	3,2
	III	3,0	3,7	2,7
	IV	0,9	0,5	0,6
1965	I	0,7	1,0	0,3
	II	1,2	1,8	0,5
	III	0,9	1,0	0,2
	IV	0,4	0,3	0,08
1967	I	0,2	0,2	0,05
	II	0,3	0,5	0,04
	III	0,2	0,3	
	IV	0,2	0,1	

Отбор радиоактивных выпадений производился с помощью марловых планшетов, эффективность захвата аэрозолей которыми была оценена равной 0,7*.

Методики гамма-спектрального и радиохимического анализа проб были описаны в работах [6, 7].

Как видно из табл. 3, изменения уровней радиоактивных выпадений во времени в 1963—1967 гг. аналогичны изменениям концентрации радиоактивных продуктов в приземном слое атмосферы. За рассматриваемый промежуток времени в среднем на квадратный километр выпало 24,7 микрои Sr⁹⁰, причем около половины этого количества приходится на 1963 г.

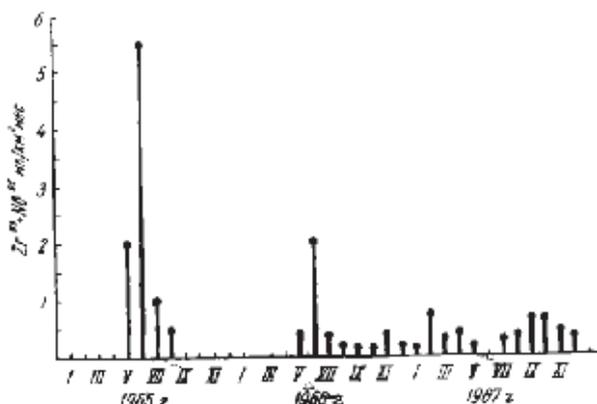


Рис. 7. Месячные выпадения из атмосферы Zr⁹⁵+Nb⁹⁵ в среднем по территории СССР.

В табл. 3 приведены средние по СССР значения радиоактивных выпадений. Максимальные уровни глобальных выпадений продуктов ядерных взрывов отличаются от средних значений примерно в 2—3 раза и, как правило, относятся к южным районам страны.

Этот факт является следствием известной закономерности распределения глобальных выпадений в северном полушарии, максимум которых приходится в среднем на полосу широт 40—50° с.ш. [2]. Специальные исследования показали, что изменения изотопного состава выпадений со временем в общем согласуются с периодами полураспада изотопов. Это говорит о том, что различия в химической природе радиоактивных аэрозолей продуктов ядерных взрывов вряд ли вызывают существенные различия в скорости их вымывания из атмосферы облаками и осадками.

¹ В работе [4] эффективность сбора принималась равной 0,36. Уточнение было сделано после многочисленных прямых сравнений результатов одновременных измерений величины выпадений на марлевые пластины и в кюветы.

В течение 1965—1967 гг. в радиоактивных выпадениях периодически наблюдались короткоживущие продукты деления. Для характеристики динамики выпадений подобных короткоживущих изотопов из атмосферы приводится рис. 7, на котором изображено изменение выпадений $Zr^{95} + Nb^{95}$ со временем. Максимальные выпадения этих изотопов совпадают по времени с наблюдавшимся максимальными концентрациями продуктов деления в приземном слое воздуха.

4. Радиоактивные загрязнения почвенно-растительного покрова

Пробы почвенного покрова отбирались в экспедициях Института экспериментальной метеорологии один раз в год июне—августе. Отбор проб производился до глубины 10 см. Изотопный состав радиоактивного загрязнения почв определялся с помощью 100-канального гамма-спектрометра и радиохимическим методом. Гамма-спектральный анализ осуществлялся на анализаторе АИ-100. Датчиком служил ФЭУ-52 с кристаллом NaJ(Tl) размерами 70×50 мм с разрешением по линии Cs^{137} 10—11% [9]. Методика радиохимического анализа проб почвы на Sr^{90} была описана ранее в работе [7].

Таблица 4

Средние уровни загрязнения почв продуктами деления (мкюри/км²) в 1963—1966 гг. (на 1 июля)

Год	Изотоп						
	$Ce^{144} + Pr^{144}$	$Zr^{95} + Nb^{95}$	$Ru^{106} + Rh^{106}$	Cs^{137}	$Sr^{90} + Y^{90}$	Sb^{125}	Mn^{54}
1963	570	460	370	86	88	46	—
1964	800	30	281	97	112	63	—
1965	576	—	140	108	108	41	21
1966	280	—	70	87	106	21	8
1967	140	—	40	84	88	15	5

В табл. 4 указываются средние по СССР уровни радиоактивного загрязнения почв отдельными радиоактивными изотопами в 1963—1966 гг. В отличие от содержания в атмосферном воздухе и в выпадениях количество радиоактивных продуктов деления в почвах и в настоящее время сохраняется относительно высоким.

В табл. 5 данные о содержании в почвах продуктов деления рассматриваются отдельно по различным широтным географическим поясам и отдельно для равнинных и горных районов. Ясно видны общая тенденция роста уровня загрязнений в направлении с севера на юг и факт более высоких концентраций продуктов деления в почвах вулканогорных районов.

Первый факт отражает общую закономерность глобального распределения Sr^{90} в почвах северного полушария, уменьшение содержания Sr^{90} в почвах от умеренных широт к полярным и тропическим широтам [2]. Более высокое содержание Sr^{90} в высокогорных районах связано как с выпадением большого количества атмосферных осадков, так и с более высокими концентрациями продуктов деления в осадках в горных условиях.

Таблица 5

Содержание в почве радиоактивных продуктов ядерных взрывов (микро/кг) в различных географических поясах и в горных и равнинных районах СССР в среднем 1967 г.

Район размещения	Изотоп			
	Cs^{137}	$Ce^{144} + Pr^{144}$	Mn^{54}	$Sr^{90} + Y^{90}$
60—70° с. ш.	50	80	4	64
50—60° с. ш.	80	150	5	96
40—50° с. ш.	120	200	6	132
Равнинные районы	90	192	5	81
Горные районы	200	240	6	258

По данным табл. 4 оценивалась мощность дозы γ -облучения от продуктов деления, находящихся на почве. При этом считалось, что все продукты деления расположены на самой поверхности почвы в виде пленки. Таким образом оценивался верхний предел мощности дозы, так как заглубление изотопов в почву не учитывалось. Методика расчета мощности дозы взята из работы [10], где она называется вариантом расчета HASL для плоского источника. В результате расчетов было получено, что средняя мощность дозы внешнего γ -облучения от продуктов деления составила в 1963 г. 10,9 мкр/час, причем примерно 70% этой величины составляет вклад $Zr^{95} + Nb^{95}$. Мощность дозы γ -облучения для 1964 г. оказалась равной 4,35 мкр/час (более 50% вклад $Cs^{137} + Ru^{106} + Rh^{106}$); для 1965 г. — 3,1 мкр/час; для 1966 — 2,2 мкр/час; для 1967 г. — 1,4 мкр/час. В последние два года основной вклад в мощность дозы давал Cs^{137} (~60—70%).

В 1967 г. был выполнен анализ распределения радиоактивных изотопов в почве по вертикали, позволивший при расчете мощности дозы учесть эффект заглубления изотопов. Расчет мощности дозы в этом случае приводился по рекомендациям [4]. Для 1967 г. была получена величина 1,15 мкр/час, которая мало отличалась от приведенной выше.

В заключение следует еще раз подчеркнуть, что в результате заключения московского договора о прекращении испытаний ядерного оружия в атмосфере содержание долгоживущих радиоактив-

ных продуктов ядерных взрывов в приземном слое атмосферы и в выпадениях к 1967 г. уменьшилось по сравнению с 1963 г. в несколько десятков раз. Начал уменьшаться и общий уровень загрязнения почв близлежащими продуктами деления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назаров Ю. А., Стукли И. Д. Гамма-излучение радиоактивных выпадений. Атомиздат, М., 1967.
2. Кароль И. Л., Малахов С. Г. Глобальное распространение в атмосфере и выпадения радиоактивных продуктов ядерных взрывов. Сб. «Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии» Госатомиздат, М., 1968.
3. Кароль И. Л., Малахов С. Г. Применение естественных радиоактивных изотопов в атмосфере для метеорологических исследований. Сб. «Вопросы ядерной метеорологии» Госатомиздат, М., 1962.
4. Малахов С. Г. и др. Радиоактивные выпадения на территории СССР в 1963 г. Госатомиздат, М., 1964. Документ ООН А/АС 82 G/L — 990, 1964.
5. Малахов С. Г. и др. Выпадения Ce-144, Sr-90, Ce-141, Zr-95+Nb-95 на территории СССР во второй половине 1962 года. Документ ООН А/АС 82 G/L — 902, 1963.
6. Сборник методов на определение радиоактивности окружающей среды. Ч. I. Отбор проб и их первичная обработка. Гидрометеоздат, М., 1966.
7. Сборник методов на определение радиоактивности окружающей среды. Ч. II. Методики радиохимического анализа. Гидрометеоздат, М., 1966.
8. Третья Международная конференция по мирному использованию атомной энергии. ООН. Доклад СССР, A/Conf. 28/P/384, 1964.
9. Чуркин В. Н., Брендахов В. Ф. Радиобиология (информ. бюллетень), № 9, 1966.
10. Beck H. L. Health Physics, v. 12, N 3, 1966.
11. Feely W., Seitz H., Logunovskina K. J., Biscate P. E., Tellus, v. 18, N 2—3, 1966.
12. HASL-183, October 1, 1967.
13. HASL-184, January 1, 1968.

IV. Методика измерений радиоактивных загрязнений

Я. И. ГАЗНОВ

МЕТОДИКА РАДИОГРАФИРОВАНИЯ ЗОЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ПРОБ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Как известно, в атмосфере эпизодически наблюдаются «свежие» радиоактивные аэрозоли от различных ядерных взрывов [1—3, 6]. В эти периоды для контроля за содержанием в тропосфере и в радиоактивных выпадениях высокоактивных частиц с индивидуальными активностями порядка 10^{-11} кюри и выше в ИЭМ ГУГМС проводится радиографирование зольных остатков проб атмосферных аэрозолей. Такие радиоактивные частицы в литературе получили название горячих¹. Отбор проб аэрозолей в тропосфере производится примерно до высоты 10 км. Пробы аэрозольных частиц отбираются на фильтрующие материалы типа ФПП-15 или ФПА-15 и марлевые пластины. Последние применяются для сбора выпадений.

Пробы озоляются в муфельной печи при температуре не выше 500°C [4]. Для радиографирования берется $1/2$ — $1/4$ часть пробы; большая часть пробы используется для радиоизотопного анализа и измерения ее активности. В качестве подложки для радиографируемой пробы служит лист кальки размером 24×30 см. В расчете на одну такую подложку берется не более $0,5$ г зольного остатка. После взвешивания зольная проба насыпается горкой на подложку из кальки, приклеенную по углам к листу картона тех же размеров, что и подложка. Затем эта проба заливается сверху вакуумным маслом Д-1 марки ВМ-1 до образования жидкой капли. Последняя с помощью скальпеля равномерно наносится на поверхность подложки (на площадь приблизительно 20×25 см²). Количество вакуумного масла, используемого для заливки, колеблется обычно в пределах 3—6 см³ в расчете на 1 г зольного остатка. После нанесения пробы на кальку она покрывается сверху тонкой и плотной конденсаторной бумагой с поверхностной плотностью 1,2 мг/см², которая по краям приклеивается к кальке. На

¹ См., например, предисловие редакторов перевода в [1].

конденсаторную бумагу в свою очередь накладывается лист картона, и все это вместе с пробой удерживается в течение суток под грузом весом 10 кг для удаления излишков вакуумного масла. После такой выдержки конверт из конденсаторной бумаги и кальки с пробой осторожно отделяется от картона, к которому он прилеплен, и ставится на радиографию.

Радиографирование производится с помощью рентгеновских пленок типа РТ-2 или РМ-1 форматом 24×30 см. Для получения автордиографий конверт с пробой закладывается между двумя листами рентгеновской пленки и помещается в светонепроницаемую кассету с плотно закрывающейся крышкой. Чтобы зафиксировать положение подложки с пробой относительно пленок, на закладке делаются три-четыре сквозных прокола. Подложки и пленки нумеруются. Номер и время постановки пробы на радиографию записываются в рабочем журнале. При наличии значительного числа одновременно радиографируемых проб они закладываются стопкой в светонепроницаемый ящик. Каждая закладка, состоящая из конверта с пробой и двух рентгеновских пленок, отделяется от другой листом плотного картона толщиной 3—4 мм. Такой картон служит хорошим экраном от бета-излучения радиоактивных частиц, находящихся в смежных пробах. Надежный контакт между рентгеновскими пленками и конвертом с радиографируемой пробой обеспечивается давлением груза весом 10 кг. Время выдержки проб на радиографии составляет две недели. Потом подложки и рентгеновские пленки извлекаются в темноте из кассет или ящика, и пленки проявляются по стандартной методике. Номера проб к времени снятия их с радиографии записываются в рабочем журнале.

Рентгеновские пленки, на которых наблюдаются автордиографические пятна почернений диаметром примерно 0,2—0,3 мм и выше, отбираются для определения размеров и числа этих пятен. Для подобного анализа используется пленка, закладываемая на пробу со стороны прокладки из конденсаторной бумаги, которая тоньше кальки и меньше поглощает бета-излучение радиоактивных частиц. Вторая пленка — контрольная. При совмещении положений рабочей и контрольной пленок автордиографические пятна почернений, наблюдающиеся на них в местах расположения высокоактивных частиц, практически совпадают друг с другом. Отклонения, обусловленные неточностями фиксации пленок, меньше 1 мм. Пятна почернений, встречающиеся на одной из пленок и не имеющие двойников на другой, являются фоновыми, и поэтому они не анализируются. Как правило, фоновые пятна почернений диаметром 0,2—0,3 мм и выше встречаются довольно редко, и выявление их при просмотре автордиографий не вызывает больших затруднений.

Дальнейший просмотр рабочих пленок для измерений размеров и подсчета числа автордиографических пятен почернений диаметром от 0,3 до 2 мм производится с помощью аппарата «Микрофото» типа 5110-1, широко применяющегося для чтения микрофотоко-

ний. Чтобы можно было на «Микрофото» просматривать автораднографии, на держатель коллектива для объектива прикрепляется четырьмя винтами самодельная крышка просмотрного столика, показанная схематически на рис. 1. Рабочая пленка раз-

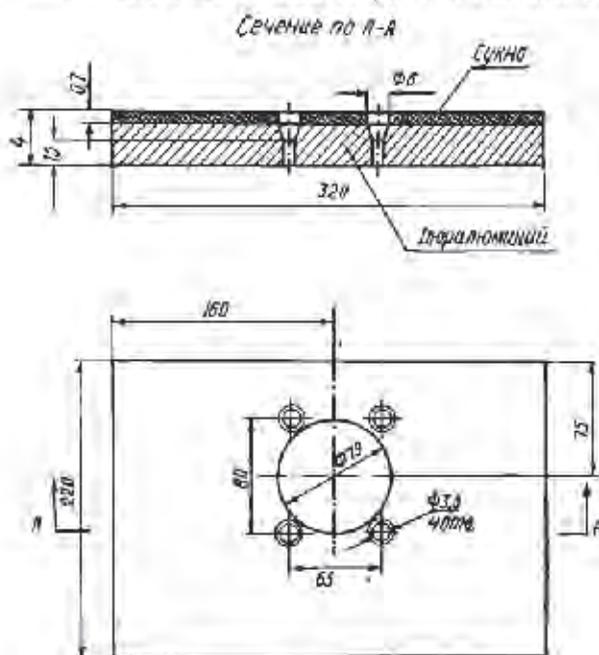


Рис. 1. Крышка просмотрного столика

резается на две одинаковые части, которыми анализируются поочередно, размер каждой из них 24×15 см.

Анализируемая автораднография отмеченных размеров помещается в прозрачную кассету шириной 15 и длиной 26 см. Эта кассета состоит из двух листов оргстекла, укрепленных по углам друг с другом четырьмя винтами. Толщина нижнего листа 3 мм, верхнего — 2 мм. Между ними проложены шайбочки толщиной 0,5 мм. Нижний лист оргстекла расчерчен на ряд кадров. Размер каждого кадра 15×20 мм. Кассета с пленкой помещается на просмотрном столике. Кадры с автораднографическими пятнами поочередно устанавливаются поочередно в центральной части окна столика (рис. 1) и проецируются на экран «Микрофото». Кассета перемещается по просмотрному столику вручную. Просмотр автораднографий производится при шестнадцатикратном увеличении (точнее, при увеличении в 15,5 раза). Размеры проекций автораднографических пятен поочередно оцениваются с помощью не-

большой масштабной линейки. При подсчетах почернений на автордиографии они группируются по интервалам размеров: 0,3—0,5; 0,5—1,0; 1—2 и выше 2 мм.

Суммарная бета-активность частицы (A) на середину периода радиорадиографирования и диаметр автордиографического пятна почернений (d) связаны соотношением [2, 3, 6] $A = Kd^2$, где K — константа, зависящая от характеристик бета- и гамма-излучения частицы, продолжительности радиорадиографирования, типа пленки и условий ее проявления, а также от способа определения диаметра d . Практически значение K находится по выборочным измерениям активностей ряда частиц и диаметров соответствующих им пятен почернений на автордиографиях. Для этого по автордиографиям вырезается ряд небольших кусочков ($\sim 1 \times 1$ см) подложек с «горячими» частицами, диаметры автордиографических пятен почернений которых составляют 0,5—2 мм. Путем нескольких последовательных делений пополам таких кусочков и обсчетов под бета-счетчиком получающихся половинок каждая выбранная горячая частица локализуется на маленькой квадратной подложечке со стороной квадрата 3—5 мм. Обсчет частиц производится с помощью торцевого бета-счетчика МСТ-17, помещенного в стальной защитный домик. Фон счетчика в защите 10—12 имп/мин ; поверхностная плотность слюдяного окошка счетчика около 5 мг/см^2 . Телесный угол ω бета-счета частиц на счетчике составляет 0,16 от 4 π .

Активность горячей частицы оценивается по соотношению

$$A \approx \frac{k_2 n_p}{\omega(1+k_{\text{обр}})},$$

где n_p — скорость бета-счета частицы; k_2 — поправочный коэффициент на поглощение бета-излучения в окошке счетчика, зольном остатке и слое воздуха между окошком и частицей; $k_{\text{обр}}$ — коэффициент обратного рассеяния бета-частиц от алюминиевой подложки, на которую помещается бумажная подложечка с горячей частицей при бета-счете. Радионуклидный состав горячих частиц меняется в широких пределах. Когда он мало отличается от состава нефракционированной смеси продуктов деления, поглощение бета-излучения таких частиц невелико и коэффициент k_2 близок к 1. Это его минимальное возможное значение. Если же радионуклиды в частицах в сильной степени фракционированы относительно $\text{Zr}^{95} + \text{Nb}^{95}$, так что их суммарная бета-активность определяется отмеченной парой изотопов, то коэффициент k_2 может увеличиваться до 3. Поэтому в среднем величина k_2 принимается равной 2:1. Среди радиоактивных изотопов, наблюдающихся в существенных количествах в горячих частицах, наиболее жестким бета-излучением обладает Pr^{144} (максимальная энергия бета-спек-

¹ В настоящее время счетчик МСТ-17 заменяется на торцевой бета-счетчик с более тонким окошком.

тра 3.15 Мэв). Для этого излучения значение $k_{\text{обр}}$ равно 0,3. В качестве нижнего предела коэффициента обратного рассеяния берется $k_{\text{обр}} = 0$, поэтому значение суммы $1 + k_{\text{обр}}$ принимается равным $1,15 \pm 0,15$.

Авторадиографические пятна почернений имеют вид черных кружочков с расплывчатыми, диффузными краями¹. Вследствие этого результаты измерений их диаметров различными операторами заметно расходятся между собой. Чтобы устранить возможные субъективные ошибки измерений диаметров пятен почернений и оценки активностей частиц по соотношению $A \approx Kd^2$, измерения диаметров d при таких оценках и экспериментальном определении константы K производятся одним и тем же оператором. В этих условиях относительно среднеквадратичная ошибка определения активности A , обусловленная неточностями измерения диаметра d , составляет $\sim 50\%$.

Для учета распада суммарной бета-активности горячих частиц проводится три-четыре измерения изменения скоростей бета-счета нескольких частиц в течение одного-двух месяцев. При расчете в первом приближении принимается, что распад происходит по экспоненциальному закону. Нередко, однако, по тем или иным причинам экспериментальные данные по бета-распаду частиц не удается получить, но «возраст» их бывает известен. В подобных случаях для перехода от активности A_1 , определенной на время t_1 , к активности $A(t)$ на время t используется известное соотношение $A(t) = A_1 (t_1/t)^\alpha$, где $\alpha \approx \text{const}$, а t_1 и t отсчитываются от момента образования частицы. По данным имеющихся исследований для ориентировочных оценок принимается $\alpha = 1,5 \pm 0,3$. После поправки на бета-распад определяется порядок суммарной бета-активности горячей частицы на время отбора пробы.

Авторадиографические пятна почернений диаметром $d > 2 \text{ мм}$ не используются для оценок активностей частиц. В этих случаях по авторадиографиям вырезаются кусочки подложки ($\sim 1 \times 1 \text{ см}$) с горячими частицами. Последние локализуются на небольших подложечках описанным ранее способом и обсчитываются три-четыре раза под торпным счетчиком в течение одного-двух месяцев.

Затем по отмеченному выше соотношению $A \sim \frac{k_p n_p}{\alpha(1+k_{\text{обр}})}$ оцениваются активности частиц. С учетом экспериментальных данных по бета-распаду эти активности приводятся на дату отбора пробы.

Наряду с измерениями бета-активностей локализованных горячих частиц исследуется также их радионуклидный состав. Для подобных исследований используются частицы с индивидуальными

¹ На авторадиографиях изредка встречаются пятна почернений неправильной формы с более или менее резкими краями. Причем при сравнении такой пленки с контрольной на последней в том же месте наблюдается аналогичное пятно почернения. Это фоновые пятна, вызванные случайно вследствие локального механического или химического действия радионуклирированного активного остатка на фоточувствительный слой рентгеновского пленки. Такие пятна, естественно, исключаются из рассмотрения.

активностями 10^{-10} — 10^{-9} кл/л и выше. Анализы радионуклидного состава проводятся с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра известными методами [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Радиоактивные вещества в атмосфере. Сб. тез. под ред. А. В. Быховского, С. Г. Малахова и Г. А. Середы. Атомиздат, М., 1963.
2. Мухомов К. П., Малахов С. Г. Результаты систематических наблюдений за горячими частицами в приземном слое атмосферы в Подпорожские в 1961 по 1963 г. Сб. «Радиоактивные изотопы в атмосфере и их использование в метеорологии». Атомиздат, М., 1965.
3. Лавренко В. И. Глобальное выпадение продуктов ядерных взрывов. Атомиздат, М., 1965.
4. Сб. книг методов по определению радиоактивности окружающей среды. Под ред. А. Н. Сидантьева. Гидрометиздат, М., 1968.
5. Сидантьев А. И. Спектрометрический анализ радиоактивных проб внешней среды. Гидрометиздат, Л., 1968.
6. Szeftly J. Debris from tests of nuclear weapons. Science, 135, 3455, p. 735, 1961.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ПЛОТНОСТИ
ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ ЙОДОМ-131 ПОСЛЕ АВАРИИ
НА ЧЕРНОВЕЦКОЙ АЭС

К.Д. МАХОНЬКО

При радиационной аварии, произошедшей 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской АЭС, доля йода-131 в широком радиоактивном продукте в воздух составляла 30%, а к 6 мая, когда аварийный реактор был изолирован инертными материалами и выбросы практически прекратились, оставалась по-прежнему самой большой (20,3%) [2]. В первые часы после аварии йод-131 представлял наибольшую радиационную опасность для населения. Поэтому уже в мае 1986 г. нами были построены и представлены в Госгидромет карты загрязненной территории йодом-131, дополненный вариант которой впоследствии был опубликован в [1]. Эта карта построена путем расчета накопления отсутствующих выпадений йода-131 на атмосферу на земной поверхности на основании данных метеостанций с помощью планшетов.

Из-за сравнительно редкой сети метеостанций карта, построенная по планшетным данным, имела особый характер, этот метод не позволял выявлять тонкую структуру карт загрязнения местности. Для построения детальной карты необходимы сплошные авиационная гамма-оптическая съемка местности, сопровождавшаяся широкомасштабным сбором проб почвы для выявления ее содержания йода-131. К сожалению, этот радионуклид относится к числу короткоживущих ($T = 8,04$ сут), вследствие чего подробное картирование загрязнения почвы йодом-131 одновременно провести не было возможности.

Предлагаемая методика позволяет восстановить детальную картину загрязнения местности йодом-131 в мае 1986 г. на основе недавних и многочисленных результатов измерения содержания в почве долгоживущего цезия-137 ($T = 30,174$ г) путем установления между ними корреляционной зависимости.

Можно ожидать, что в процессе выброса из разрушенного реактора йод-131 и цезий-137 вели себя сходным образом, поскольку оба являются изотопами лантана, хотя и в разной степени, элементов. Однако в дальнейшем, после оседания на подстилающую поверхность, эти радионуклиды ведут себя по-разному. Цезий-137 прочно фиксируется почвенно-растительным покровом, в более летучий йод-131 может частично испаряться в воздух при благоприятных для этого погодных условиях. Поэтому данные о содержании йода-131 в почве одного и того же участка

по результатам отбора проб в равное время могут различаться. Из-за распада йода-131 карта его содержания в почве должна быть построена на определенную дату. Поэтому наиболее достоверными являются данные вышесказанных проб, отобранных в определенные времена, отстоявшие не очень далеко от даты, на которую строится карта.

Для построения зависимости плотности загрязнения почвы йодом-131 от плотности на загрязнении цезием-137 используется следующая информация:

- 1) данные гамма-спектрометрического анализа содержания йода-131 в пробах почвы с указанием даты отбора каждой пробы;
- 2) данные гамма-спектрометрического анализа содержания йода-131 в пробах суточных атмосферных выпадений;
- 3) данные о содержании цезия-137 в тех же образцах почвы и атмосферных выпадениях, в которых определены йод-131.

Пробы анализируются на гамма-спектрометре без предварительного осаждения, чтобы не потерять летучий йод-131.

Данные о содержании йода-131 в почве пересчитываются на выбранную дату t_0 , на которую строится карта, по формуле

$$A_0 = A_t e^{\lambda(t-t_0)} \quad (1)$$

где A_0 , A_t — соответственно плотности загрязнения почвы йодом-131 на момент времени t_0 , в котором вычислена строилась карта, и на момент времени отбора пробы почвы t ; λ — постоянная радиоактивного распада йода-131. Время отсчитывается в сутках от момента аварии.

При построении карты используются сравнительно малое количество данных, состоящий из результатов анализов проб почвы, отобранных преимущественно в период времени, когда загрязнение почвенного покрова в основном уже оформлялось, т.е. выделом последующих выпадений йода-131 из атмосферы в загрязнение почвы можно пренебречь. С другой стороны, в этот период не должны входить данные анализов проб почвы, отобранных спустя длительное время после окончания основной части процесса выведения йода-131 из атмосферы на поверхность земли, чтобы по возможности избежать влияния наряду этого источника о поверхности почвы.

Оценка, проведенная путем прослеживания динамики изменения суточных выпадений йода-131 на почве, показывает, что при построении карты по состоянию на 15 мая 1986 г. указанным выше условиям удовлетворяют пробы почвы, отобранные в период с 5 мая по 5 июня. При этом относительная погрешность определения A_0 по формуле (1) оценивается выражением

$$\frac{\Delta A}{A_0} = 1 - \frac{A_t}{A_0} e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где A_0 — истинная плотность загрязнения почвы 15 мая 1986 г.

Для примера на рис. 1 приведены кривые изменения погрешности $\Delta A/A_0$ в зависимости от момента отбора пробы почвы при пересчете активности йода-131 на 15 мая 1986 г. по закону радиоактивного распада без учета фактических выпадений йода-131 из атмосферы.

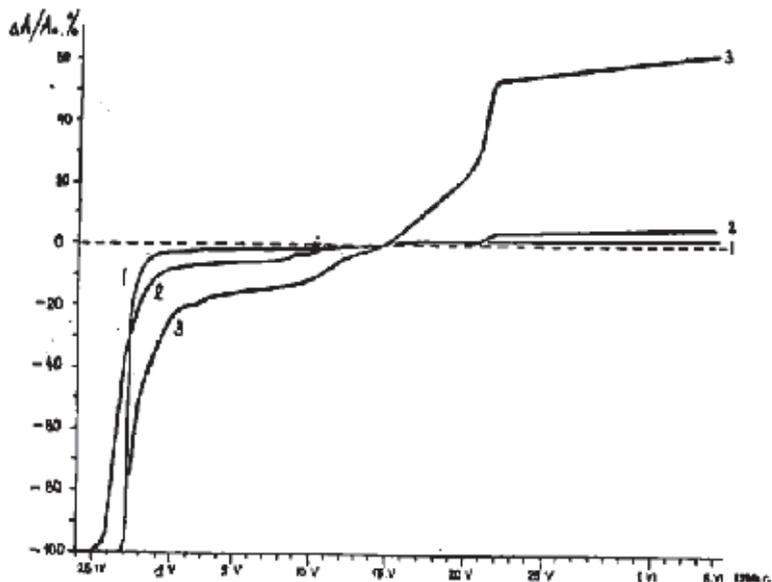


Рис. 1. Относительная погрешность пересчета плотности загрязнения почвы йодом-131 на 15 V 1986 по закону радиоактивного распада в зависимости от даты отбора пробы почвы:
1 — Гомель, 2 — Брест, 3 — Минск

Данные о суточных выпадениях йода-131 из атмосферы на поверхность земли выстраиваются для каждого пункта отбора проб в непрерывный временной ряд до момента t_0 (до 15 мая 1986 г.). Пропуски в этом ряду восстанавливаются путем линейной интерполяции в двойном логарифмическом масштабе пропорционально суммарной бета-активности

выпадения в те дни, для которых отсутствуют данные по йоду-131. Плотность загрязнения почвы йодом-131 рассчитывается путем последовательного суммирования суточных выпадений этого изотопа из атмосферы от момента аварии до 15 мая с учетом радиоактивного распада по формуле

$$A_i = A_{i-1} e^{-\lambda \Delta t} + P_i \Delta t, \quad (3)$$

где A_i, A_{i-1} — плотности загрязнения почвы йодом-131 в i -ю и $(i-1)$ -ю сутки после аварии соответственно; P_i — суточные выпадения йода-131 из атмосферы в i -ю сутки; $\Delta t = 1$ сут — шаг по времени.

Данные о содержании цезия-137 в тех же сериях проб почвы или атмосферных выпадений, в которых определялось содержание йода-131, используются для установления корреляции между этими изотопами. Данные по цезию-137 используются без поправки на распад, а расчет эквивалента суточных выпадений цезия-137 к 15 мая 1986 г. производится простым суммированием выпадений этого изотопа в данном пункте с момента аварии. Чтобы выделить в кювете цезия-137 аварийного происхождения ^{137}Cs , из содержания суммарного цезия-137 в пробе вычитается глобальный фон, который перед аварией для данного региона составлял в среднем $0,056 \text{ Кз/км}^2$.

Полученный массив первичных значений накопления на почве выпадений цезия-137 в йодом-131 к 15 мая и массив первичных значений плотности загрязнения почвы цезием-137 на дату отбора пробы к йодом-131, перевычисленный на 15 мая, используются совместно для установления эмпирической зависимости содержания йода-131 в почве от содержания цезия-137.

Для этого используются логарифмы полученных значений соответствующих плотностей загрязнения и методом наименьших квадратов находят коэффициенты в уравнении прямой линии. После потенцирования получается степенная зависимость плотности загрязнения почвы йодом-131 по составу на 15 мая 1986 г. от плотности загрязнения цезием-137 аварийного происхождения.

Достаточную точность дает графический вариант определения коэффициентов в уравнении прямой. Для этого на миллиметровке в блочном масштабе строятся зависимость содержания в почве йода-131 от содержания цезия-137 аварийного происхождения. По экспериментальным точкам прямая проводится на глаз. Коэффициенты находятся графически для уравнения прямой в каноническом виде:

$$\lg(^{131}\text{I}) = a \lg(^{137}\text{Cs}) + \lg b, \quad (4)$$

где $a = \operatorname{tg} \alpha$, α - угол наклона прямой к оси абсцисс, $\operatorname{tg} b = \operatorname{tg}(\frac{137}{131}T)$
при $\operatorname{tg}(\frac{137}{131}Cs) = 0$.

Рассмотрим пример построения рассматриваемой эмпирической формулы

В качестве исходного массива данных использовались ежедневные наблюдения за выпадениями на атмосфере Иода-131 и цезия-137 в период с 26 апреля по 15 мая 1986 г. и данные о содержании этих изотопов в пробах почвы, отобранных с 15 мая по 2 июня 1986 г. Основное количество проб отобрано на маршрутах от Киева до Тулы через район Гомеля, ограниченное число проб отобрано и в западных районах Беларуси.

Зависимость плотности загрязнения почвы Иодом-131 от плотности ее загрязнения цезием-137 аварийного происхождения по состоянию на 15 мая 1986 г. изображена на рис. 2. Видно, что в билогарифмическом масштабе данные измерений достаточно хорошо укладываются на прямую, коэффициент корреляции между рассматриваемыми величинами $r = 0,91$, т.е. по своему значению приближается к единице, соответствующий строго функциональной связи.

Прямой на рис. 2 соответствует следующая эмпирическая формула:

$$^{131}I = 3,77 \left(^{137}Cs - ^{137}Cs_p \right)^{0,91} \quad (5)$$

где $^{137}Cs - ^{137}Cs_p = \Delta^{137}Cs$ и ^{131}I - в $\text{Кл}/\text{м}^2$ ($1 \text{ Кл}/\text{м}^2 = 37 \text{ КБк}/\text{м}^2$). Погрешность расчетов по этой формуле определяется разбросом точек на рис. 2.

Формулой (5) можно пользоваться для восстановления пробной карты загрязнения местности Иодом-131 в 1986 г. по более многочисленным данным о загрязнении почвы долгоживущим цезием-137, учитывая, что все последующие после аварии годы, когда Иод-131 уже распался, рядом министерств и ведомств проводилась широкомасштабная и детальная гамма-сцинтиметрическая съемка загрязненных районов.

При использовании в расчетах данных о содержании в почве цезия-137, полученных до 1988 г., погрешность за счет неустановленного радиоактивного распада этого радионуклида составляет менее 5%, а до 1991 г. - 10%, что пренебрежимо мало. В последующие годы поправку на радиоактивный распад цезия-137 можно вводить, приводя его измеренную активность к дате 15 мая 1986 г. по формуле (1), где время Z выражается в годах, а A_0 , A_1 и A_2 - соответствующие значения для цезия-137.

Стандартная функция (5) не очень удобна для расчетов из-за дробного показателя степени. Поэтому для специалистов, не имеющих расчетов наивков, приведем программу расчета по формуле (5) на БИТ-овом калькуляторе "Электроник" БЭ-34.

После включения калькулятора для составленной программы нажимаются клавиши в следующей последовательности:

F	ПРГ	ИН8	+	МПС	ΣY	Fx%	МПГ	x
С/П	Ы	00	F	АВТ				

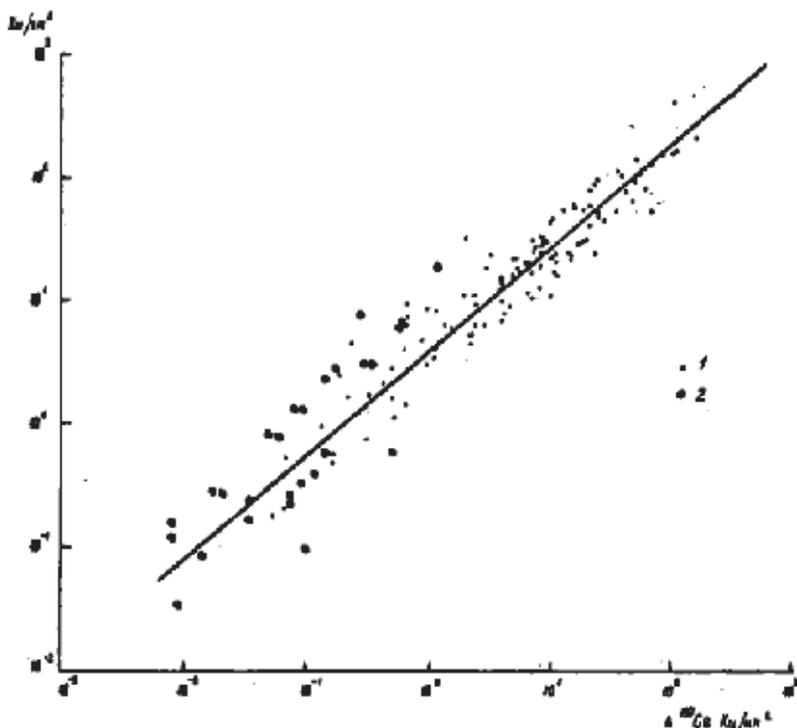


Рис. 2. Связь между плотностью загрязнения почвы ^{137}I , пересчитанной на 15 мая 1986 г., и плотностью ее загрязнения цезием-137 аварийного происхождения ^{137}Cs для Европейской территории:
 1 - почва, 2 - расчет по количеству выпадений радионуклидов в атмосфере

Параметры формулы (6) заносятся в память калькулятора путем нажатия клавиш:

3,77П7 0,056 /-/- П8 0,847П9

Проверка производится нажатием клавиши:

Г В/О С/П

Если на индикаторе выводится число 3,8903975, то калькулятор готов к работе, если нет - все операции следует повторить.

Вычисление производится путем набора значений плотности загрязнения почвы данным-137 на клавишах калькулятора (каждый раз значение появляется на индикаторе) и нажатием клавиши С/П.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М р з о н ъ к о К. П. Изменения радиационной обстановки после аварии на Чернобыльской АЭС. - В кн.: Радиационные последствия Чернобыльской аварии. М.: Ядерное общество СССР, 1991. - С. 31-53.
2. Ч е р н о б и л ь : радиационное загрязнение природных сред / П.А.Израиль, С.М.Винюковский, В.А.Ветров, В.Н.Петров, Ф.Я.Ровнянский, В.Д.Отулен. - Л.: Гидрометеоиздат, 1990. - 246 с.

ВВЕДЕНИЕ

Общесоветская служба наблюдения и контроля загрязнения природных сред (ОГСНК), первая очередь которой была развернута в 10-й пятилетке в СССР на базе учреждений Госкомгидромета СССР и других министерств и ведомств, является фактически осуществленным национальным мониторингом загрязнения окружающей среды главным образом на импактном (т. е. в районах непосредственного выброса загрязнений в природную среду) уровне. Поэтому главные задачи службы наблюдения и контроля вытекают из основных задач мониторинга загрязнения, сформулированных в работах чл.-кор. АН СССР Ю. А. Израэля. К этим задачам относятся:

а) регистрация современного уровня загрязнения окружающей среды и, следовательно, современного уровня загрязнения химического состава этой среды;

б) определение тенденций изменения химического состава природных сред во времени, прогноз уровней загрязнения окружающей среды в ближайшем будущем;

в) оценка возможных последствий загрязнения окружающей среды в настоящее время и в будущем и разработка рекомендаций по их предотвращению или уменьшению.

Система контроля загрязнения почв является частью общей службы наблюдения и контроля и поэтому к ней относятся все перечисленные выше задачи.

Настоящие методические указания по контролю загрязнения почв связаны главным образом с решением первой задачи. Во втором томе указаний будет приведен ряд методик, позволяющих оценить влияние загрязнения почв на изменение их важнейших характеристик качества и плодородия. Что касается методов прогностических оценок будущих загрязнений почв, то они находятся в стадии разработки и поэтому еще далеки от внедрения на сети. Практика показывает также, что уловить временную тенденцию изменения уровней антропогенного загрязнения почв

трудно. Для этого требуются многолетние измерения и большая их статистика.

В числе стратегических направлений развития ОГСНК и, следовательно, системы контроля загрязнения почв в этой и последующих пятилетках можно назвать следующие направления. Во-первых, разработка и внедрение методов комплексных наблюдений, комплексной оценки и комплексного прогноза загрязнения всех природных сред в районах, прилегающих к источникам загрязнения. При этом должны быть выбраны и обоснованы приоритетные загрязнители. Во-вторых, разработка и внедрение региональных методов контроля, оценок последствий и прогноза загрязнения отдельных крупных промышленных и агропромышленных комплексов (например типа КАТЭК или БАМ). В-третьих, нахождение количественных связей между уровнями загрязнения природных сред и соответствующими выбросами токсичных веществ в окружающую среду. Это позволит не только нормировать выбросы, но и даст в наши руки один из важных рычагов, позволяющих регулировать качество природных сред (изменение химического состава этих сред). В-четвертых, разработка и внедрение автоматизированных систем сбора, хранения, обработки и выдачи информации о загрязнении природных сред и его последствиях. В-пятых, метрологическое обеспечение ОГСНК и развитие стандартизации в области систем контроля загрязнения окружающей среды.

Остановимся теперь на перечислении ряда конкретных задач лабораторий УГКС в области усовершенствования и развития методов контроля загрязнения почв.

Основная задача сводится, конечно, к исполнению представленных здесь методических указаний. Они определяют в той или иной степени основные этапы деятельности лаборатории в настоящее время в процессе контроля загрязнения почв: отбор проб почвы, обработку этих проб и подготовку их к анализу, проведение анализа на содержание в них токсичных веществ, отчетность лабораторий и форму информации, поступающей из сетевых лабораторий в головной НИИ.

Дополнительно хотелось бы остановиться на трех моментах. Во-первых, следует обратить внимание на достоверность получаемой и пересылаемой информации о загрязнении почв. В этом плане важно выполнение рекомендаций по внешнему и внутреннему контролю измерений содержания пестицидов и металлов в почве. В ближайшие годы аналогичные системы контроля будут внедряться и для других ингредиентов. С другой стороны, пока еще мало изученным является вопрос о пространственной изменчивости концентраций токсичных веществ в почвах, в ряде случаев даже для фоновых районов. Это существенно затрудняет выработку рекомендаций по количеству отбора представительных проб, действительно характеризующих загрязнение почв конкретного участка территории с заданной ошибкой. Поэтому некоторые лаборатории предполагается привлечь в II и пятилетке к изучению харак-

териястик пространственной изменчивости концентраций ряда ингредиентов по специальным заданиям и методикам головного НИИ.

Во-вторых, важным моментом в организации системы контроля загрязнения почв является правильный выбор приоритетных ингредиентов. Он может быть разным для разных регионов. В определении этих приоритетных ингредиентов большую помощь головному НИИ могут оказать местные лаборатории, например, путем сбора и обобщения данных о выбросах в окружающую среду техногенных веществ или о внесении в почву пестицидов и удобрений.

В-третьих, желательно, чтобы лаборатории Госкомгидромета работали в тесном контакте с лабораториями Минсельхоза СССР (головной НИИ — Центральный институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства, Москва) и Минздрава СССР. Эти контакты включают в себя обмен информацией, проведение сравнительных измерений проб и т. д. Тем более важно сотрудничество между отдельными измерительными группами лабораторий УГКС, занимающимися контролем загрязнения разных сред. Особенно это относится к случаям использования одинаковой аппаратуры (газовые хроматографы, атомно-абсорбционные приборы и т. д.) или аналогичной методики. Такое сотрудничество поможет быстрее решить проблему перехода к методам комплексного контроля и комплексной оценки загрязнения природных сред. Некоторые первые шаги, касающиеся контроля загрязнения окружающей среды фтором, организацию наблюдений за выпадениями и некоторых других моментов, сделаны в настоящем руководстве.

Важным, но пока еще слабым звеном системы контроля загрязнения почв является оценка степени последствий загрязнения. В настоящее время основным методом оценки степени загрязнения почв является сравнение фактических уровней с ПДК (предельно допустимыми концентрациями), причем ПДК разработаны главным образом на гигиенических принципах. Поэтому встречаются большие трудности в интерпретации и в объективной оценке загрязнения почв суммой наиболее токсичных веществ или о тех веществах, для которых отсутствует всякое нормирование. В последнем случае уровни загрязнения приходится просто сравнивать с фоном.

В заключение отметим, что при наличии соответствующих возможностей весьма полезно было бы участие лабораторий УГКС в научных исследованиях. Такие исследования можно строить на базе экспериментального материала, получаемого в процессе контроля загрязнения природных сред. К таким исследованиям можно отнести упомянутое выше изучение пространственной неоднородности загрязнений. Весьма полезным для проблемы прогноза загрязнений было бы проведение оценок отдельных элементов баланса загрязняющих веществ в природных средах, включающих в себя как выброс этих веществ в эту среду, так и их миграцию.

между средами и скорость разложения. Такие работы необходимо вести по согласованию и при руководстве головного НИИ. В качестве примера конкретных работ можно указать на оценку доли промышленных выбросов, оседающих на почву в ближней к предприятию зоне и уходящих в региональные и глобальные загрязнения; на оценку скорости разложения пестицидов в различных физико-географических, почвенных и климатических условиях; на оценку скоростей ухода загрязнений из почвы в водные системы, в растения и т. д.

Виды наблюдений и контроля загрязнения почв для каждого УГКС устанавливаются специальными распоряжениями УКЗ Госкомгидромета СССР. Эти распоряжения основываются на степени приоритетности того или иного ингредиента для данного региона, а также финансовыми и штатными возможностями.

Раздел I. КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ПЕСТИЦИДАМИ

I.1. Введение

Пестициды — общепринятое в мировой практике собирательное название химических средств защиты растений. Они используются для борьбы с вредными насекомыми (инсектициды), с сорными растениями (гербициды), с грибными болезнями растений (фунгициды), для удаления листьев (дефолианты), для подсушивания растений (десиканты) и др.

Пестициды могут попадать в почву при прямом внесении и высеве протравленных семян, с атмосферными осадками, остатками погибших растений, насекомых и животных, в результате смыва с обработанных растений при их поливе.

Длительность сохранения пестицидов в почве зависит не только от почвенно-климатических условий, но и от физико-химических свойств пестицидов, их биологической активности, дозы и кратности применения. Поэтому для каждой почвенно-климатической зоны страны разрабатываются рекомендации по применению пестицидов с учетом длительности сохранения в почве и остаточного токсического действия [13, 14, 18, 21].

Одним из важнейших нормативов, позволяющих оценивать степень загрязнения почвы химическими веществами, является предельно допустимая концентрация (ПДК) этих веществ. Во ВНИИГИНТОКС предложен принцип гигиенического нормирования допустимого содержания пестицидов в почве, заключающийся в определении таких концентраций пестицида в контактирующих с почвой средах (растениях, воде, воздухе), которые не представляют опасности для здоровья людей и не влияют отрицательно на общесанитарные показатели почвы [16, 17].

Экспериментально обоснованы и утверждены Минздравом СССР ПДК в почве для 30 пестицидов и ОДК (ориентировочно допустимые концентрации) для 14 пестицидов, которые представлены в табл. I.1.1. В июне 1981 г. Минздравом пересмотрены и утверждены (№ 2401-81) новые значения ПДК в почве для ДДТ и ГХЦГ, равные $0,1 \text{ млн}^{-1}$ (мг/кг). Их прежнее значение равнялось $1,0 \text{ млн}^{-1}$ (мг/кг).

Таблица 1.1.1

Предельно и ориентировочно допустимые концентрации пестицидов
в почве (ПДК и ОДК), млн⁻¹ (мг/кг)

Пестицид	ПДК	Пестицид	ОДК
ДДТ и его метаболиты (суммарное количество)	0,1	Арезин	0,7
Гамма-ГХЦГ (линдан)	0,1	Бромфос	0,4
ГХЦГ (гексахлоран)	0,1	Гербан	0,7
ГХБД (гексахлорбутадиеп)	0,5	Дактал	0,1
Далор	0,5	Днурон	0,6
Гептахлор	0,05	Монурон	0,6
Полихлоринен (ПХП)	0,5	Пирамин	0,7
Полхлоркамфес (ПХК)	0,5	Семерон	0,6
Севан	0,05	Солан	0,6
Линурон	1,0	Тербацил	0,4
Фенурон	1,8	Тиллам	0,6
Далапон	0,5	Тиодан	0,1
Пропанид	1,5	Трефлан	0,1
Банвел Д	0,25	Ялан	0,9
Хлорвин	0,05		
Прометрин	0,5		
Сямзин	0,2		
Атразин	0,5		
Фозалон	0,5		
Фталофос	0,1		
Карбофос	2,0		
Рогор (фосфамид, БИ-58, диметат)	0,3		
Хлорофос	0,5		
Цинбс	1,8		
Гардона	1,4		
Мышьяк	2,0		
Формальдегид	7,0		
Базудин	0,2		
Кеьтан	1,0		
Метафос	0,1		

1.2. Отбор проб почвы [15]

Для получения репрезентативных (представительных) данных по загрязнению почвы пестицидами одно из главных мест должно быть отведено отбору проб почвы на анализ. Для сравнимости результатов важно, чтобы сроки, выбор пунктов и способ отбора проб были идентичны.

В настоящее время существуют «Унифицированные правила отбора проб сельскохозяйственной продукции, продуктов питания и объектов окружающей среды для определения микроколичеств пестицидов» (М., Минздрав СССР, 1980), где в основу отбора проб почвы положен метод, предложенный ИЭМ в «Методических указаниях по контролю загрязнения почвы» (М., Гидрометеонадат, 1977).

1.2.1. Выбор места и частота отбора смешанных образцов

Для определения загрязнения почвы пестицидами почвенные образцы отбираются на сельскохозяйственных полях под различными культурами два раза в год: весной — после схода снега и осенью — после уборки урожая. В каждой области (крае или республике) рекомендуется обследовать каждый год примерно 20 хозяйств (колхозов или совхозов), равномерно распределенных по территории природно-экономического района.

Один раз в пять лет проводится повторное обследование ранее обследованных хозяйств, а в целом за пятилетку должны быть обследованы все природно-экономические районы, области (края или республики).

В каждом хозяйстве обследуется 3—5 полей под основными культурами. Кроме того, необходимо выбрать 1—2 поля под разными культурами в одном или разных хозяйствах (из числа обследованных), на которых пробы отбирались ежегодно. Это необходимо для выяснения динамики исчезновения пестицидов из пахотного слоя почвы.

Хозяйства для обследования намечаются предварительно в лабораториях перед выездом в поле, для чего используются данные станций защиты растений и сельхозуправлений по применению пестицидов. Выбираются хозяйства как с максимальным применением пестицидов, так и со средним и низким. Непосредственно в хозяйствах выясняются площадь обследуемых полей и история их с точки зрения обработки.

Для отбора проб целесообразно привлекать сотрудников существующей агрометеосети Госкомгидромета.

Для характеристики загрязнения пестицидами почвы на определенной площади сельскохозяйственных угодий отбираются смешанные образцы. Смешанный образец составляется путем смешивания индивидуальных проб почвы, отобранных в разных точках данной площади или пробной площадки, характеризующей загрязнение этой площади. Площадь поля, с которой отбирается смешанный почвенный образец, зависит от ряда факторов, в том числе рельефа местности, возделываемых культур, шестроты почвенного покрова, способа обработки полей пестицидами.

1.2.2. Отбор смешанных образцов

1.2.2.1. Для выбора площади поля, которую характеризует смешанный образец, выделяются три категории местности и почвенных условий:

I категория. Лесная зона, а также районы с волнистым рельефом, с разнообразными почвообразующими породами и неоднородным почвенным покровом. Одна смешанный образец характеризует загрязнение пестицидами почвы на площади 1—3 га.

II категория. Лесостепные и степные районы с расчлененным рельефом. Один смешанный образец характеризует загрязнение почвы на площади 3—6 га.

III категория. Степные районы с равнинным или слаборасчлененным рельефом и однообразным почвенным покровом. Один смешанный образец характеризует загрязнение почвы на площади 10—20 га.

В горных районах, где размер сельскохозяйственных полей небольшой и велика комплексность почвы, один смешанный образец характеризует загрязнение почвы пестицидами на площади 0,5—3 га.

В условиях орошаемого земледелия смешанный образец характеризует загрязнение почвы на площади 2—3 га согласно позывной карте.

Оценка степени обследования территории проводится с учетом вышеприведенной градации. Таким образом, смешанный образец, отобранный с пробной площадки, характеризует загрязнение почвы на площади 1—3 га для I категории, 3—6 га для II, 10—20 га для III и т. д.

1.2.2.2. Смешанный образец отбирается с пробной площадки размером 100×100 м или 100×200 м, которая обычно располагается в типичном для данного поля месте. Если площадь поля в степной зоне под зерновыми культурами 200 га, то на этом поле закладывается 15—20 пробных площадок и отбирается 15—20 смешанных образцов. Таким образом, каждый смешанный образец характеризует загрязнение пестицидами почвы на площади 10—20 га.

Пробная площадка закладывается на расстоянии 100 м от края поля. С краевых участков также могут быть отобраны смешанные образцы, но они будут характеризовать загрязнение почвы только на площади краевых участков.

Смешанный образец составляется из индивидуальных почвенных проб, отобранных на глубину пахотного горизонта (0—20, 0—30). Количество индивидуальных проб, из которых составляется смешанный образец, расположение точек отбора на пробной площадке зависят от способа отбора.

При отборе проб почвы буром ($d=4,5-5$ см) смешанный образец составляется из 20 кернов (уколов), отобранных через равные промежутки по диагонали пробной площадки, т. е. примерно через 7—10 м.

При отборе проб почвы лопатой точки отбора располагаются по «конверту» пробной площадки (четыре точки в углах площадки и одна в центре), вокруг каждой из пяти точек делается еще по четыре прикопки. Из прикопки почвенным ножом вырезается монокл� размером 10×10×20 см (20 см — глубина пахотного горизонта). Таким образом, смешанный образец составляется из 25 индивидуальных проб.

При отборе проб под зерновыми и пропашными культурами, а также под виноградниками необходимо в равной мере захватить

рядки и междурядья. В садах прикопки закладываются примерно в 1 м от ствола дерева.

Отобранные одним из этих способов пробы ссыпаются на крафт-бумагу, тщательно перемешиваются, квартовются 3—4 раза (хорошо измельченная почва разравнивается на бумаге в виде квадрата, делится на четыре части, две противоположные части отбрасываются, две оставшиеся части перемешиваются). Оставшаяся после квартования почва разравнивается на бумаге, условно делится на 6—9 квадратов, из центра которых берется примерно одинаковое количество почвы в полотняный мешочек или в крафт-бумагу. Вес смешанного образца около 0,5 кг. Образец снабжается этикеткой, регистрируется в полевом дневнике. В дневнике записываются следующие данные по каждому образцу: порядковый номер смешанного образца, место отбора, рельеф местности, сельскохозяйственное угодье, площадь поля, дата отбора, кто отбирал; параллельно оформляется сопроводительный талон (табл. 1.12.1).

У агрономов по защите растений для каждого обследуемого поля заранее высвоятся сроки и нормы обработки полей пестицидами в текущем и предстоящем году.

Сразу после составления смешанных образцов они просушиваются до воздушно-сухого состояния в лаборатории, в химически чистых помещениях, или на воздухе, в защищенных от солнца местах, для предотвращения фотохимического и микробиологического разложения пестицидов.

Образцы почвы в естественно-влажном состоянии хранят в холодильнике.

1.2.3. Отбор проб при изучении вертикальной миграции пестицидов

Для изучения вертикальной миграции пестицидов закладывается почвенный разрез размером 0,8×1,5×2,0 м (соответственно, ширина короткой «лицевой» стенки, ширина длинной стенки и глубина разреза), который располагается так, чтобы «лицевая» стенка была освещена солнцем. Почва выбрасывается на длинные боковые стенки, при этом верхние горизонты выбрасываются в одну сторону, нижние — в другую. «Лицевая» стенка зачищается, в разрез опускается сантиметр, которым отмечается глубина каждого горизонта, «Лицевая» стенка служит для описания почвы. На противоположной стенке делаются ступеньки для удобства работы.

Перед взятием образцов проводится краткое описание места, где заложен разрез, и почвенных горизонтов (цвет, влажность, структура, плотность, механический состав, новообразования, включения, корневая система; отмечается глубина, с которой почва вскипает от добавления 10%-ной соляной кислоты).

Образцы берут сначала из нижних горизонтов, постепенно переходя к верхним. Отмечается глубина взятия образцов. Толщина образца 10 см. С каждого генетического горизонта берется один образец почвы.

Механический состав определяется методом скатывания шпaura (по Качинскому). Выделяются песок, супесь, легкий суглинок, средний суглинок, тяжелый суглинок, глина.

Всего по области (республике) в течение пятилетки делается примерно 5—8 разрезов на полях, занятых различными культурами.

Более подробно о закладке и описании почвенных разрезов можно узнать из учебного пособия Ф. Я. Гаврилюка «Полевое исследование и картирование почв» (М., Высшая школа, 1963).

1.2.4. Подготовка почвы к анализу

Из воздушно-сухого смешанного почвенного образца весом 0,5 кг методом квартования в лаборатории берется средняя проба весом 0,2 кг. Из нее тщательно удаляются корни, камни. Отобранная средняя проба растирается в фарфоровой ступке, просеивается через сито с диаметром отверстий 0,5 мм. Из просеянной средней пробы берется навеска для анализа весом 10—50 г.

1.2.5. Отбор проб для определения глобального загрязнения почв пестицидами

Чтобы судить о глобальном загрязнении почв пестицидами, необходимо знать о состоянии почв в местах, удаленных от сельскохозяйственных районов, там, где заведомо никогда не применялись пестициды. Для этого выбираются заповедники. Отбор проб почвы в заповедниках должен проводиться в «буферной зоне», т. е. в зоне, окружающей абсолютно охраняемую зону заповедника.

В основу системы отбора проб почвы в заповедниках положен принятый в почвоведении метод почвенно-геохимических профилей. Для отбора смешанных образцов закладываются почвенные разрезы на этих профилях. Количество смешанных образцов зависит от площади буферной зоны и протяженности выбранных геохимических профилей при условии, что за период 5 лет каждые 10 га будут охарактеризованы одной-двумя пробами. Смешанные образцы отбираются с глубины 0—5—10 см. В пределах геохимических профилей на разных биогеоценозах один раз в 5 лет закладываются почвенные ключи, на которых делаются почвенные разрезы и проводится детальное обследование. Количество почвенных ключей зависит от разнообразия почвенно-климатических условий и определяется в каждом конкретном случае специалистом.

Среднее обнаружение составляет 80%, среднее квадратичное отклонение 3—9%.

Определению хлорорганических инсектицидов (ХОИ) мешают фталаты, хлорированные парафины и полихлорбифенилы (ПХБ), что видно из хроматограммы, представленной на рис. 1.3.1. Для доказательства загрязнения за счет ХОИ или ПХБ экстракт почвы подвергается щелочному гидролизу (щелочное дегидрохлорирование). Сравнение хроматограмм экстрактов до дегидрохлорирования и после него позволяет сделать заключение о характере загрязнения, так как в случае ПХБ количество пиков на хроматограмме дегидрохлорированного экстракта и их высота остаются неизменными, в случае п,п'-ДДТ, пик п,п'-ДДТ исчезает и увеличивается пик п,п'-ДДЭ (ДДТ превращается в ДДЭ в результате отщепления HCl) и т. п., что подробно описано в 1.4 и в [1—3, 5, 7].

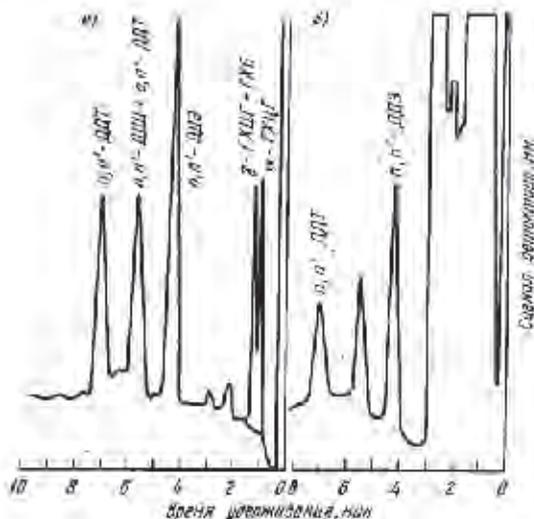


Рис. 1.3.2. Хроматограммы гексанового экстракта почвы, очищенного от серы с помощью ТВА и сульфата натрия (а) и не очищенного от серы (б). неподвижная фаза SE-30

Определению ХОИ мешают также элементарная сера, применяемая в сельском хозяйстве, и сероорганические соединения, являющиеся продуктами жизнедеятельности тиобактерий. Присутствие серы и сероорганических соединений подтверждается появлением либо широкого перегруженного пика со временем удерживания ГХБ и ГХЦГ (рис. 1.3.2), либо нескольких пиков, время удерживания которых также совпадает со временем удерживания

ГХВ и ГХЦГ (рис. 1.3.3). Сера и сероорганические соединения удаляются при обработке гексановых экстрактов водным раствором тетрабутиламмонийсульфата (ТБА) в присутствии сернисто-кислого натрия (рис. 1.3.2) [7].

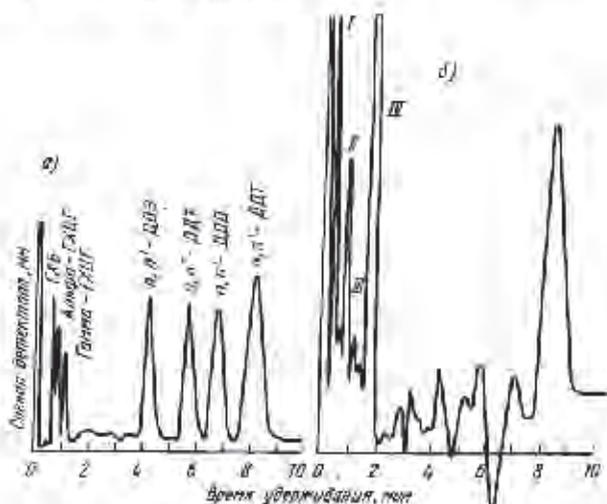


Рис. 1.3.3. Хроматограммы гексанового экстракта почвы, очищенного от серы с помощью ТБА и сульфата натрия (а) и не очищенного от серы (б). Неподвижная фаза SF-96+QF-1 (типа OV-17)

1.3.2. Характеристика хлорорганических инсектицидов

Хлорорганические пестициды — ХОП (инсектициды, акарициды, фумиганты) являются эффективным средством борьбы с вредителями зерновых, зернобобовых, технических культур, лесонасаждений, плодовых деревьев и виноградников, овощных и полевых культур. Они используются для предпосевной обработки семян и фумигации почвы [23].

Отличительной особенностью большинства ХОП является их стойкость к воздействию различных факторов внешней среды, что приводит к накоплению ХОП в объектах окружающей среды. При этом отмечается нарастание концентрации ХОП в последующих звеньях биологической цепи: почва—корнеплоды, вода—донные отложения—растения—гидробионты (планктон, рыба) — птицы, питающиеся рыбой.

В почве ДДТ и его метаболиты, а также ГХЦГ могут обнаруживаться спустя 4—12 лет после их применения.

Физико-химические и токсикологические свойства ХОП приведены в табл. 1.3.1.

Таблица 1.3.1

Физико-химические и токсикологические свойства хлорорганических инсектицидов [25, 26]

Пестицид	Эмпирическая формула	Молекулярный вес	Температура кипения, °С	Растворимость в воде, мг/л	LD ₅₀
п,п'-ДДТ (4,4'-ДДТ)-1,1'-дихлордифенилтрихлорэтилметан	C ₁₄ H ₉ Cl ₅	354,5	105—109	1—20	250—400
о,п'-ДДТ (2,4'-ДДТ)-2,4'-дихлордифенилтрихлорэтилметан	C ₁₄ H ₉ Cl ₅	354,5	—	20	—
п,п'-ДДД (4,4'-ДДД)-4,4'-дихлордифенилдихлорэтилметан (метаболит п,п'-ДДТ)	C ₁₄ H ₁₀ Cl ₄	320,0	112,0	20	3400
Альфа-ГХ(ЦП)-1, 2, 3, 4, 5, 6 гексахлорциклопентан (гексахлоран)	C ₆ H ₆ Cl ₆	290,85	157—158	2,0 мг/л	300—500
Гамма-ГХ(ЦП)-1, 2, 3, 4, 5, 6 гексахлорциклопентан (линдан)	C ₆ H ₆ Cl ₆	290,85	112,0	7,8—10 мг/л	125
п,п'-ДДЕ (4,4'-ДДЕ)-4,4'-дихлордифенилдихлорэтилметан (метаболит п,п'-ДДТ)	C ₁₄ H ₈ Cl ₄	318,0	Метаболит ДДТ	1,3—14	—
Полхлоранен (ПХП, хлортен)	—	—	—	—	350
Полхлоржафен (ПХЖ, токсафен)	—	413,82	65—90	740	60

Примечание. Все пестициды хорошо растворимы в эфире, углеве, бензоле, толуоле, хлороформе, дихлорэтане и других органических растворителях.

Раздел II. КОНТРОЛЬ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ МЕТАЛЛАМИ

II.1. Введение

Второй раздел посвящен методикам контроля за загрязнением почвы тяжелыми металлами. Тяжелыми металлами принято называть металлы с атомной массой более 40. Их кларк в земной коре и почве выражается сотыми и тысячными долями процента.

В настоящее время не разработаны ПДК тяжелых металлов в почвах, кроме ртути, свинца и хрома, поэтому для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами предлагается сравнивать уровни загрязнения с естественным фоном. В качестве фона можно использовать значения содержания металлов в почвах районов, удаленных от промышленных центров, либо кларки. Методика определения фона подробно описана в [1].

Данный раздел состоит из 8 глав. Первая глава — введение. Во второй главе показаны особенности отбора проб почвы в случае контроля почв загрязнениями промышленного происхождения. В третьей главе представлены методики определения содержания металлов в почве методом эмиссионного спектрального анализа, а в четвертой главе — методом атомной абсорбции.

О химическом выделении подвижных форм соединений техногенных металлов в почвах говорится в пятой главе. В шестой главе приводится методика определения плотности выпадений тяжелых металлов из атмосферы, в седьмой — определения pH. Представлению информации о загрязнении почв в внешнему и внутреннему контролю посвящена восьмая глава.

Особенностью рекомендаций является то, что в ряде случаев предлагается несколько вариантов отдельных частей методики. В работе можно использовать любой из них в зависимости от имеющихся приборов и других условий работы.

II.2. Отбор и предварительная подготовка проб

II.2.1. Выбор места отбора

Отбор проб почвы для определения загрязнений промышленного происхождения производится один раз в год в летний период. Как правило, для контроля выбираются почвы, занятые куль-

турными растениями, по необходимости (при наличии целинных или залежных земель) отбирать пробы параллельно и на целине.

Для определения точек отбора проб почвы применяется азимутальный метод. Каждый год пробы отбираются вокруг промышленных центров по четырем румбам на расстояниях 1, 2, 3, 5 и 10 км. Один раз в пять лет обследование почв проводят более подробно по всем румбам и на следующих расстояниях: 0; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 10; 15; 20; 30 и 50 км. Положение точек отбора сначала отмечается на карте. Отмеченные точки служат ориентировочными опорными пунктами при выборе места отбора пробы. Снег отбирается по сокращенной программе, но дополнительно еще на 20 км.

В случае необходимости более тщательного изучения пространственного распределения загрязнений сведения о количестве и порядке отбора проб можно взять из руководства [11].

11.2.2. Методика отбора проб почвы

Методика отбора проб почвы описана в п. 1.2. На целине пробу берут на глубину 5 см.

11.2.3. Методика отбора проб растений

Пробы растений отбираются на тех же участках, что и пробы почвы. С площади 2 га по методу конверта отбирают пять проб, составляя из них смешанный образец. Растения отбираются с корнями. Почву с корней тщательно отряхивают, корни отрезают от стеблей и помещают в отдельный полиэтиленовый или хлопчатобумажный мешочек, чтобы не загрязнить стебли и листья растений частицами почвы. Остальную часть растения заворачивают в крафт-бумагу. Пробу маркируют, записывая номер, место отбора, название растений, дату (в сопроводительном талоне), и отправляют в лабораторию.

11.2.4. Методика подготовки проб почвы к анализу

Основное требование при отборе и подготовке проб почвы — предохранение их от загрязнений на всех этапах, т. е. при взятии образца в поле, упаковке, транспортировке, хранении в лаборатории, при доведении до воздушно-сухого состояния, замельчению и растирании.

Взятые в поле пробы высушиваются до воздушно-сухого состояния на бумаге или восковке. Высушивание следует проводить в тени, в безветренном месте. В экспедиционных условиях для этой цели удобно использовать специально оборудованные сушилки, представляющие собой деревянный настил с металлическими дугами над ним, на дуги натянуты ткань или марля. На настил положить бумагу или восковку, на которую тонким слоем рассыпать почву и все накрыть тканью. Это защищает образцы от ветра и солнца. На ночь в случае дождя закрывать полиэтиленовой пленкой.

После высушивания проба почвы перетирается в большой фарфоровой ступке и просеивается через капроновое сито с размером отверстий 1 мм. Непросеянные комки почвы растираются и просеиваются еще раз. Из измельченной пробы методом квартования берутся средние пробы. Одна проба весом около 100 г — для определения форм металлов и атомно-абсорбционного определения валового содержания. Вторая проба весом около 10 г запаковывается в полиэтиленовый пакетик. Она идет на определение ртути, проводимое ИЭМ. Пробы высылаются в ИЭМ по особому распоряжению. Третья проба весом тоже около 10 г просеивается через сито с меньшим диаметром. Из нее тщательно отбираются корешки и она растирается в агатовой или халцедоновой ступке со спиртом до состояния пудры. Количество спирта (этилового) зависит от качества и состояния пробы — примерно 5—7 мл на одну пробу. Далее проба помещается в фарфоровый тигель (или кварцевый) и озоляется в муфельной печи при температуре 450°C два-три часа. После озоления проба почвы вновь перетирается со спиртом и в таком виде используется для спектрального эмиссионного анализа для определения металлов. Определять содержание металлов эмиссионным методом можно из жидкой пробы. Методика разложения почвы описана в П.4, а ход анализа такой же, как для растворимых форм выпадений (п. П.6).

Примерно 100 г почвы необходимо для определения микробиологической активности почвы; для изучения агрохимических свойств почвы — еще 200 г. Остаток пробы почвы должен храниться в специальных коробках, на которых зафиксированы: номер пробы, время и место отбора, название почвы. Эта проба может пригодиться для определения металлов (через несколько лет), для определения бенз(а)пирена, фтора и других ингредиентов, позволяющих судить о загрязнении почвы.

П.2.5. Методика подготовки проб растений к анализу

Перед анализом пробы растений (отдельно корни и стебли) промывают от пыли и почвы сначала водопроводной водой, затем дистиллированной. Первичную сушку растений проводят в хлопчатобумажных мешочках в хорошо проветриваемом отапливаемом помещении или на солнце на чистых листах бумаги. Затем пробы растений помещают в сушильный шкаф в кварцевых чашках и сушат при температуре 80°C. Высушенные растения измельчают с помощью ножа из нержавеющей стали на части длиной до 1 см.

Было показано, что тонко измельченный растительный материал озоляется значительно хуже, чем измельченный на более крупные части, и вероятность загрязнения растений трупными частями рабочих мельниц при тонком измельчении гораздо больше. Минерализацию растений проводят методом сухого озоления. Навеска озоляемого материала не должна превышать 5 г. Пробу переносят в кварцевую чашку и помещается в холодную му-

фельную печь. Температура печи поднимается постепенно, проба озоляется при температуре печи 450—500°C.

В начале озоления необходимо создавать небольшой приток воздуха, чтобы предотвратить скопление углерода в золе и ускорить переход некоторых металлоорганических соединений в трудноразлетучие окислы. Следует отметить, что при совершенно одинаковых условиях озоления растений из разных семейств или из разных районов требуется неодинаковое количество времени (до 10 ч). При правильном озолении полученная зола имеет белый, кремоватый, розоватый или охристый цвет. Зола взвешивается.

II.3. Определение содержания тяжелых металлов в почве методом эмиссионного спектрального анализа

II.3.1. Принцип метода

Основой количественного спектрального анализа является зависимость между интенсивностью спектральных линий каждого элемента и концентрацией возбужденных атомов в источнике света. Число возбужденных атомов, в свою очередь, зависит от энергии возбуждения и концентрации соответствующего элемента в исследуемой пробе. Следовательно, интенсивность линий анализируемого элемента зависят от его количественного содержания в пробе.

Количественный спектральный анализ по своему практическому осуществлению является относительным методом. Определение неизвестной концентрации какого-либо элемента производится путем сравнения интенсивности излучения в анализируемой пробе с соответствующей интенсивностью излучения при измерении эталонов.

Предлагаемый метод определения металлов в почвах носит название метода трех эталонов. Сущность этого метода — фотографирование трех или большего числа эталонов и анализируемых проб на одной фотопленке или фотопластинке и построение градуировочного графика для каждой спектрограммы в координатах $\Delta S - \lg C$, где ΔS — разность плотности почернения аналитической линии элемента и фона, $\lg C$ — логарифм концентрации элемента в пробе.

II.3.2. Приборы и аппаратура

Эмиссионный спектральный анализ состоит из следующих трех основных связанных между собой процессов и операций: 1) испарение пробы и возбуждение спектров элементов некоторого количества исследуемого вещества в электрической дуге (или в другом источнике); 2) разложение сложного излучения возбужденных атомов в спектре с помощью спектрального прибора; 3) регистрация полученного излучения.

Таблица 11.3.5

Метрологическая характеристика методики определения валового содержания металлов в почвах эмиссионным спектральным анализом

Элемент	Стандартное содержание, мг/мл ⁻¹	Средняя квадратичная ошибка единичного определения \bar{s}_x	Средняя квадратичная ошибка среднего определения $\bar{s}_{\bar{x}}$	Погрешность определения Δ	Относительная погрешность определения Q, %
Свинец	16	2,3	0,73	1,6	10
Марганец	542	60	19	42	7,7
Хром	84	7,8	2,5	5,6	6,7
Никель	25	9,3	2,9	6,5	26
Молибден	1,0	0,37	0,12	0,27	27
Олово	2,8	0,11	0,035	0,078	2,8
Ванадий	64	18	5,7	13	20
Медь	17	5,6	1,8	4,0	24
Цинк	45	11	3,5	7,8	17
Кобальт	10	1,4	0,44	0,98	10

Примечание. $k=10$, $d=0,95$.

11.4. Определение металлов в почве методом атомной абсорбции

11.4.1. Описание метода

В основе атомно-абсорбционного (АА) метода лежит явление селективного поглощения света атомами химического элемента. Принципиальная схема атомно-абсорбционного спектрофотометра приведена на рис. 11.4.1.

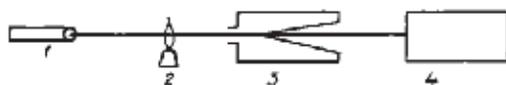


Рис. 11.4.1. Схема атомно-абсорбционного спектрофотометра

Источник света 1, аналитическая ячейка (пламя, графитовая трубка) — 2, монохроматор 3 и детектирующее устройство 4 являются необходимыми узлами атомно-абсорбционных спектрофотометров любой конструкции.

Источником света служит лампа с полым катодом, излучение которой имеет линейный спектр, соответствующий спектру поглощения определяемого элемента. Аналитическая ячейка представляет собой устройство, в котором происходит атомизация вещества и поглощение света источника образующимися атомами. Атомизация происходит обычно в пламени или при нагревании до высокой температуры и термически устойчивой кювете. Атомиза-

ция в пламени требует перевода образца в раствор, в то время как непламенная атомизация в ряде случаев позволяет использовать образец без предварительной обработки, однако уступает пламенной в производительности.

С помощью монохроматора выделяется аналитическая (поглощаемая) линия источника света. На фотодетекторе регистрируется степень поглощения этой линии атомами вещества, что является мерой количества определяемого элемента. Согласно закону Бугера—Ламберта—Бера интенсивность светового потока после поглощения атомами вещества находится в экспоненциальной зависимости от толщины слоя поглощения

$$I = I_0 C - K C \alpha, \quad (\text{II.4.1})$$

где I — интенсивность света после поглощения; I_0 — интенсивность света до поглощения; C — концентрация атомов; α — толщина слоя поглощения; K — коэффициент, зависящий от длины волны света.

Логарифмируя уравнение (II.4.1), получаем

$$\lg I = \lg I_0 - K C \alpha 0,43.$$

или

$$\lg \frac{I_0}{I} = 0,43 K C \alpha.$$

Выражение $\lg \frac{I_0}{I}$ носит название оптической плотности (D), т. е. оптическая плотность пропорциональна концентрации атомов

$$D = 0,43 K C \alpha.$$

Измеряя оптическую плотность серии эталонных растворов, строят график зависимости оптической плотности от концентрации, из которого затем определяют неизвестную концентрацию.

11.4.1.1. Помехи в выполнении анализа: методу АА присущи три основных источника аналитических помех, имеющих различную природу — инструментальные, физико-химические и физические.

Величина инструментальных помех определяется флуктуациями излучения источника света и темнового тока фотоэлемента, а также утомляемостью фотоэлемента.

Физико-химические помехи зависят от химического и минералогического состава пробы и физико-химических процессов, происходящих при атомизации. Плотность, поверхностное натяжение и вязкость раствора, определяемые его химическим составом, могут влиять на размер капель аэрозоля и количество раствора, поступающего в пламя, и тем самым изменять чувствительность метода и точность выполнения анализа. В процессе атомизации образуются не только атомы вещества, но и различные химиче-

ские соединения, снижающие концентрацию определяемого элемента. Так, при определении Cd в присутствии Al образуется термически устойчивое соединение типа $л CaO \cdot m Al_2O_3$, снижающее интенсивность поглощения кальцием. Известны также случаи увеличения чувствительности определения ряда элементов в присутствии органических растворителей.

К физическим помехам относится излучение определяемого элемента в пробе, неселективное поглощение молекулярными соединениями, а также рассеяние света неспарявшимися частицами пробы. Свечение определяемого элемента уменьшает оптическую плотность, т. е. способствует занижению аналитических данных. Напротив, неселективное поглощение и рассеяние света приводит к завышению результатов анализа.

Влияние помех в значительной степени зависит от типа определяемого элемента и от состава пробы. В современных атомно-абсорбционных спектрофотометрах ряд помех ослаблен или полностью устранен с помощью различных физико-технических приемов. Так, нестабильность источника света компенсируется лучом сравнения, который попадает на фотоэлемент, минуя аналитическую ячейку. Свечение анализируемого элемента, или, другими словами, фон аналитической ячейки, устраняется модуляцией потока. Модулированный, прерывистый сигнал от источника света вызывает соответственно прерывистый фототок, который радиотехническими приемами отделяют от постоянного фототока аналитической ячейки и измеряют. Для коррекции неселективного молекулярного поглощения используют дополнительный источник света со сплошным спектром; таким источником может быть, например, разрядная лампа, наполненная дейтерием.

II.4.1.2. Определение кадмия, цинка, меди, свинца и хрома в почве

Техника собственно атомно-абсорбционного анализа определяется инструкцией, прилагаемой к прибору. При этом для обеспечения оптимальных параметров прибора необходимо подобрать

Таблица II.4.1

Интервалы линейной зависимости оптической плотности от концентраций и чувствительность определения микроэлементов

Элемент	Цинк	Медь	Никель	Свинец	Хром	
Интервал линейной зависимости D от C , мкг/мл	0,02—3	0,02—10	0,01—3	0,1—20	0,2—30	0,1—20
Чувствительность определения микроэлементов, мкг/мл на 1% поглощения	0,02	0,02	0,01	0,1	0,2	0,1

соответствующий состав горючей смеси, выбрать по высоте эффективный участок пламени горелки. Следует иметь в виду, что указанные моменты имеют весьма большое значение для увеличения чувствительности прибора. При дальнейшей подготовке прибора к работе необходимо определить диапазон линейной зависимости оптической плотности D от концентрации элемента C . Ориентировочно эти данные приведены в табл. II.4.1.

Каждый атомно-абсорбционный (АА) спектрофотометр характеризуется минимальной чувствительностью по отношению к определяемому элементу, которую принято выражать концентрацией элемента в мкг/мл раствора, вызывающей поглощение 1% энергии попадающего света. Соответствующие величины приведены в табл. II.4.1.

II.4.1.3. Экстракция металлов из почв

В большинстве случаев металлы извлекают из почв азотной, соляной, серной и хлорной кислотами или их смесью без разрушения силикатной основы почв.

В отдельных случаях используется более сложная процедура полного разложения почв плавиковой кислотой с добавлением азотной и хлорной кислот [10]. Однако эта процедура длительна во времени и связана с использованием весьма агрессивной и опасной плавиковой кислоты, которая растворяет стекло и обычные металлы, и работа с ней проводится в платиновой или тефлоновой посуде. В то же время для контроля загрязнения почв определение валового содержания металлов не представляет практического интереса, так как металлы в силикатной или иной химически инертной форме практически не вступают в химические и биологические процессы, не усваиваются растениями, т. е. не представляют никакой опасности в качестве токсичного загрязнителя [3].

II.4.1.4. Рекомендуемый ход анализа

На основании предварительно проведенных исследований [13] мы рекомендуем для сети станций контроля за загрязнением среды быструю и простую процедуру анализа кадмия, меди, цинка, никеля, свинца и хрома в почве, извлекаемых горячей 1 н. HNO_3 . Выбор азотной кислоты обусловлен растворимостью всех ее солей, а также способностью азотной кислоты окислять и переводить в растворимое состояние особенно при повышенной температуре металлы, их окислы, сульфиды и другие химические соединения. Степень извлечения металлов из почв 80—90%.

11.5. Определение подвижных форм соединений техногенных металлов (Pb, Cd, Co, Ni, Cu, Zn, Mn) в почвах

11.5.1. Принцип метода

Почва в значительной степени способна иммобилизовать соединения металлов за счет процессов сорбции, реакций гидролиза, осаждения на органических и неорганических компонентах почвенно-поглощающего комплекса, перевода их в неподвижные (фиксированные) и недоступные для растений формы. Поэтому общее (валовое) содержание металлов в почве не всегда может характеризовать степень опасности загрязнения этой почвы. Более правильно говорить о роли «подвижных» и «доступных» для растений форм.

В основу методики определения этих форм ТМ в техногенных почвах положен метод выделения микроэлементов из почвы — метод рационального химического анализа. Он включает в себя обработку почвы различными экстрагентами. Поскольку трудно подобрать химический экстрагент, извлекающий отдельные химические соединения элемента, определение форм в какой-то степени условно. Однако система вытяжек, предлагаемая в настоящей главе, опробована при определении форм микроэлементов на разных типах почв в практике агрохимической службы и дает надежную информацию о подвижных и доступных формах элементов.

Определение подвижных форм металлов желательно проводить в случае высоких концентраций валовых их количеств в почве, а также тогда, когда необходимо исследовать миграцию токсичных металлов из почв в растения.

11.5.2. Экстракция форм соединений металлов из почвы

«Подвижные» соединения, основной резерв для питания растений, составляют водно-растворимые, ионнообменные, легко-растворимые, непрочные сорбированные формы металлов. Их определяют в различных вытяжках из почвы. В качестве экстрагентов используют кислоты, различные соли, буферные смеси и би-дистиллированную воду [1, 8].

Для экстракции берут навески воздушно-сухой почвы, равные 5—10 г. Экстракцию разных форм проводят из отдельных навесок почвы в 2-кратной повторности.

Определение содержания металлов в фильтратах вытяжек из почв проводят атомно-абсорбционным методом с пламенной атомизацией. В большинстве техногенных почв, загрязненных металлами, можно определить их содержание прямым атомно-абсорбционным методом без концентрирования. При двукратном извлечении металлов из почв приходится второй фильтрат концентрировать методом упаривания (см. ниже).

11.5.2.1. Экстракция кислотно-растворимых форм

Кислотно-растворимые формы металлов определяют в вытяжках 1 н. HNO_3 . Этот экстрагент применяют для извлечения металлов из техногенных почв с целью предварительной оценки их загрязнения.

Пробу почвы массой 5 г помещают в коническую колбу на 300 мл. К пробе добавляют 50 мл 1 н. HNO_3 и взбалтывают суспензию на ротаторе в течение часа или после 3-минутного встряхивания настаивают в течение суток. Колбу закрывают пробкой, завернутой в полиэтиленовую пленку. Вытяжку фильтруют через сухой складчатый фильтр с белой лентой. Перед фильтрованием проба перемешивается и переносится на фильтр по возможности полностью. Первые порции фильтрата (3—5 мл) отбрасывают, последующие собирают в полиэтиленовую баночку на 100 мл и отмечают, как фильтрат после первой экстракции (фильтрат I). Фильтр вместе с почвой (во избежание потери навески) переносят в другую коническую колбу на 300 мл, приливают 50 мл 1 н. HNO_3 и взбалтывают суспензию на ротаторе в течение часа (или настаивают в течение суток). Вытяжку фильтруют через сухой складчатый фильтр, перенося весь осадок на фильтр. Почву на фильтре промывают 10 мл 0,1 н. HNO_3 . Промывные воды и фильтрат II объединяют и упаривают в кварцевой чашке досуха. Затем растворяют осадок в 5 мл HNO_3 . Раствор сливают в полиэтиленовую баночку, отмечают его как фильтрат II и определяют в нем содержание металлов.

При расчете содержания элементов в почве данные анализом фильтратов I и II суммируются.

11.5.2.2. Экстракция подвижных форм металлов ацетатно-аммонийным буферным раствором

Подвижные формы металлов извлекают также ацетатно-аммонийным буферным раствором с $\text{pH}=4,8$. Этот экстрагент принят агрохимической службой для оценки обеспеченности почв микроэлементами, так как содержание элементов в этой вытяжке коррелирует с содержанием их в растениях [5], т. е. этот экстрагент извлекает «доступные» для растений формы.

Пробу почвы массой 5 г помещают в коническую колбу емкостью 300 мл, приливают 50 мл ацетатно-аммонийного буферного раствора с $\text{pH}=4,8$. Суспензию взбалтывают 1 ч (или настаивают в течение суток). Вытяжку фильтруют через сухой складчатый фильтр, отбрасывая первые порции фильтрата. Фильтрат I переносят в полиэтиленовую баночку на 100 мл. Экстракцию повторяют, как указано выше. Вытяжку фильтруют через сухой складчатый фильтр, почву на фильтре промывают 10—15 мл буферного раствора, фильтраты и промывные воды объединяют и упаривают в кварцевых чашках на водяной бане до 5—10 мл, затем приливают 2 мл HNO_3 (концентрированной) и 2 мл 30%-ного раствора перекиси водорода для окисления органических веществ, выпаривают до влажных солей, снова добавляют HNO_3 и H_2O_2 в тех же количествах и выпаривают досуха. Сухой остаток растворяют в 5 мл 1 н. HNO_3 и помещают в полиэтиленовую колбочку на 50 мл (фильтрат II).

Обменные формы соединений тяжелых металлов определяют после вытеснения их 1 н. раствором уксуснокислого аммония с $\text{pH}=6,5-7,0$.

10 г почвы помещают в колбу на 300 мл, добавляют 100 мл 1 н. раствора уксуснокислого аммония, взбалтывают на ротаторе 1 ч (или настаивают в течение суток). Суспензию фильтруют через сухой складчатый фильтр, отбрасывая первые порции фильтрата I. Аликвоту фильтрата I (50 мл) концентрируют упариванием до 5 мл, как указано выше при выделении форм, «доступных» для растений. Концентрат помещают в полиэтиленовую баночку для анализа. Фильтр вместе с почвой переносят в колбу на 300 мл и повторяют экстракцию, но первые порции фильтрата не отбрасывают, а почву на фильтре промывают 20 мл 1 н. раствора уксуснокислого аммония. Фильтрат II и промывные воды упаривают в кварцевой чашке на водяной бане с добавлением HNO_3 и H_2O_2 (см. выше).

11.5.2.3. Экстракция соединений кадмия

В отличие от других металлов, нерастворимые соединения кадмия, составляющие техногенную фазу, могут растворяться в растворе 1 н. $\text{CH}_3\text{COONH}_4$. Вследствие этого анализ данной вытяжки даст неправильную информацию о наличии обменных форм кадмия. Для кадмия предлагается другой экстрагент — 1 н. азотнокислый калий.

Извлечение обменных катионов кадмия проводят из 10 г почвы, добавляя 100 мл раствора 1 н. HNO_3 с $\text{pH}=6,5-7,0$. Суспензию после встряхивания на ротаторе (или настаивания в течение суток) фильтруют через сухой складчатый фильтр с белой лентой, отбрасывая первые порции фильтрата. Экстракцию проводят второй раз из той же навески почвы точно так же, как первый.

Равновесный раствор после второй фильтрации концентрируют с помощью экстракции. С этой целью помещают аликвоту

раствора, равную 50 мл, в делительную воронку. Добавляют 5 мл 10%-ной аскорбиновой кислоты, 5 мл 10 н. серной кислоты, 1 мл 1 М раствора KI и 10 мл метилизобутилкетона. Встряхивают 3 мин и разделяют фазы. При длительном хранении концентрата рекомендуется провести рекстракцию. Из органической фазы кадмий рекстрагируют 5 мл 0,1 н. соляной кислоты. Однократная экстракция обеспечивает переход металла в органический растворитель, а рекстракция, проведенная сразу же после экстрагирования, обеспечивает 100%-ное извлечение металла из органического экстракта.

11.5.2.4. Экстракция водно-растворимых соединений

Водно-растворимые соединения элементов определяют в водной вытяжке из почвы. 10—20 г почвы (в зависимости от содержания металлов) помещают в колбу на 300 мл, закрывают пробкой с полиэтиленовой прокладкой и взбалтывают 1 ч на ротаторе. Вытяжку отфильтровывают с помощью водоструйного насоса через ультратонкий фильтр (Синиор) с диаметром пор до 0,1 мк. Допускается фильтрование через фильтр с белой лентой. Если вытяжка не прозрачна, фильтрование повторяют до тех пор, пока она будет прозрачна. Фильтрование следует проводить в комнате, свободной от паров кислот и аммиака. Так как фильтрация идет медленно, для защиты вытяжки от испарения воронку прикрывают покровным стеклом.

Аликвоту вытяжки (50—100 мл) выпаривают до сухих солей в кварцевой чашке на водяной бане, растворяют соли в 5 мл 1 н. HNO_3 и раствор сливают в полиэтиленовую емкость для анализа.

Одновременно со всеми вытяжками ставят холостой опыт с соответствующим реактивом, проводя его через все стадии анализа, исключая взятые пробы. Анализ проводят атомно-абсорбционным методом, описание которого приводится в 11.4 настоящих методических рекомендаций.

11.5.3. Приготовление растворов

11.5.3.1. Раствор 1 н. азотной кислоты готовят из концентрированной кислоты (ос. ч.) разбавляя ее бидистиллированной водой. Для приготовления 1 л 1 н. раствора HNO_3 необходимо взять 67 мл концентрированной HNO_3 (пл. 1,4) и добавить до 1 л бидистиллированной воды.

11.5.3.2. Для приготовления 1 л буферного раствора с $\text{pH}=4,8$ необходимо 108 мл 98%-ной уксусной кислоты и 75 мл 25%-ного раствора аммиака (NH_4OH) добавить к 800—900 мл бидистиллированной воды, переменить, измерить pH и, если необходимо, довести его до $\text{pH}=4,8$, после чего объем раствора довести водой до 1 л.

11.5.3.3. 1 н. раствор KNO_3 готовят из реактива квалификации ос. ч. Навеску соли в 101 г растворяют в 800 мл бидистиллированной воды, доводят рН до 6,5 раствором щелочи (концентрированной), доливают воды до 1 л.

11.5.3.4. 1,0 н. раствор $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с рН=7,0 можно приготовить из соли ацетата аммония из расчета 77,08 г соли на 1 л раствора, доводят рН раствора до 7,0 с помощью аммиака. Лучше готовить этот раствор смешиванием уксусной кислоты с аммиаком. 57 мл ледяной уксусной кислоты разбавляют дистиллированной водой до 800 мл, нейтрализуют 25%-ным раствором NH_4OH до рН=7,0 и добавляют до 1 л.

11.5.3.5. Бидистиллированную воду освобождают от CO_2 кипячением в течение 30 мин. Воду хранят в колбе, закрытой пробкой с сифоном и хлоркальциевой трубкой, заполненной катрановой известью или аскаритом.

11.5.4. Приборы, посуда и реактивы

Колбы конические КнКШ-250-29/32 ТС ГОСТ 10394-72.

Аппарат для встряхивания АВУ-1, ТУ-64-1-1081-73.

Фильтры с белой лентой ТУ-6-09-1678-77 ФЭС диаметр 9 см.

Воронки В 75-110 ГОСТ 8613-75.

Баночки полистиленовые на 50—100 мл ТУ 6-19-45-74 БЦ.

Чашки кварцевые ЧКП (50 и 100 мл) ГОСТ 19908-74.

рН-метр рН-340 ТУ 25-05-1689-74.

Насос водоструйный ГОСТ 10696-75.

Баня водяная ТУ 46-22-608-75.

Азотная кислота МРТУ 6-09-644-63 ос. ч. 12-6, ГОСТ 61-69 х. ч.

Аммиак водный МРТУ 6-09-3266-66 ос. ч. 16-4.

Уксуснокислый аммоний МРТУ 6-09-1766-64 ос. ч.

Перекись водорода (30%-ный раствор) МРТУ 6-02-570-69 ос. ч.

Серная кислота ГОСТ 4204-66 х. ч.

Соляная кислота ГОСТ 14261-69 ос. ч. 7-4.

Азотнокислый калий МРТУ 6-09-2044-64 ос. ч. 9-3.

Уксусная кислота МРТУ 6-09-644-63 ос. ч. 12-6.

Подистый калий МРТУ 6-09-3778-67 ос. ч. 3-3.

Метилэтилкетон МРТУ 6-09-1432-71 ч.

Аскарит МРТУ 6-09-6592-70 ч.

11.5.5. Расчет содержания подвижных форм

Результаты определения форм соединений металлов в почве следует выражать в частях на млн (млн^{-1}), что соответствует ранее принятому содержанию металлов (в мг/кг почвы). Содержание металлов в почве вычисляют по формуле

$$C = \frac{aV}{PK},$$

где a — содержание металлов (мкг/мл), определенное в фильтрате атомно-абсорбционным методом; P — навеска почвы, г; V —

общий объем раствора вытяжки (мл), соответствующий всей навеске почвы; K — коэффициент концентрирования.

Для определения содержания металлов в почве, из которой проводили 2-кратное извлечение, результаты определения металлов в двух фильтратах суммируются.

11.6. Определение плотности выпадения металлов из атмосферы

Для осуществления контроля загрязнения почвы в районе промышленных центров необходимо определять выпадения токсикантов на почву, или иначе плотность их потока.

Суммарные атмосферные выпадения складываются из так называемых мокрых выпадений, т. е. выпадений, поступающих с атмосферными осадками, и сухих выпадений, поступающих на подстилающую поверхность земли с оседающей пылью.

Представляет интерес не только валовое определение содержания металлов, но и определение в растворимых осадках формах, наиболее подвижных и доступных для усвоения живыми организмами.

Нормирования плотности выпадений ТМ не проводится, поэтому для оценки загрязнения почв за счет выпадений рекомендуется проводить сравнение уровней плотности выпадений с естественным фоновым уровнем. Фоном принято считать значения плотности выпадения ТМ в районах, удаленных от промышленных центров примерно на 20 км.

Ниже предлагаются методики отбора и анализа проб сухих и мокрых выпадений ТМ, определения плотности потока ТМ и приоритетных токсикантов для данного обследуемого района.

При определении границ горизонтального распространения атмосферных выбросов промышленными предприятиями используется метод оценки выпадений на подстилающую поверхность.

Распределение изолиний плотности потока металлов позволяет представить общую картину распределения загрязнений на местности.

11.6.1. Отбор проб атмосферных выпадений

При отборе проб атмосферных выпадений, предназначенных для определения в них ТМ, требуется соблюдения некоторых предосторожностей. Для обеспечения неизменности состава проб при их сборе, хранении и анализе необходимо выполнять следующие условия:

не допускать контакта пробы с металлическими и сорбирующими поверхностями;

не допускать загрязнения проб посторонней водой и пылью; тщательно мыть всю используемую посуду содовым раствором с последующим ополаскиванием дистиллированной водой;

не допускать испарения пробы, для чего пробоотборник экспонировать только во время выпадения осадков, а отобранные пробы хранить в тщательно закупоренных сосудах.

Экспонирование пробоотборника только во время выпадения осадков предохранит также пробы от загрязнения сухими выпадениями, величина которых для различных элементов сильно колеблется в зависимости от расположения источников загрязнения и от географического района отбора проб и иногда может достигать 70—80%. При длительном хранении проб выпавший может проходить сорбция на стенки сосуда или выделение определенных элементов из материала сосуда. Наиболее подходящим материалом следует считать полиэтилен, флексиглас и стекло.

Пробы атмосферных выпадений обычно отбираются на метеопостах. При определении границ горизонтального распространения атмосферных выбросов промышленными предприятиями пробы атмосферных выпадений отбираются по той же схеме, что и пробы почв.

11.6.1.1. Мокрые выпадения

Для отбора проб дождя можно использовать любую бутылку с воронкой, для отбора снега — кювету с высокими бортиками, которые удовлетворяют перечисленным выше условиям. Для предотвращения выдувания снега из кювет желательно предусмотреть ветровую защиту. Удобным пробоотборником дождя и снега является полиэтиленовый бак с крышкой. Пробоотборник во время осадков выставляется на метеоплощадке на деревянный стол высотой 1—1,5 м.

11.6.1.2. Сухие выпадения

Отбор проб сухих выпадений производится с помощью планшетов, покрытых фильтротканью ФПП-15. Планшеты располагаются на высоте 1,5 м вокруг промышленных комплексов по нескольким радиальным направлениям, начиная непосредственно от предприятия и до 20—30 км от него. Фильтры после экспонирования озоняются, и содержание в них металлов определяется методом спектрального анализа.

Использование ткани ФПП для улавливания выпадающих из атмосферы металлов имеет свои недостатки: сравнительно высокое содержание микроэлементов в чистой ткани позволяет уверенно определять выпадения ТМ только в зоне влияния промышленных источников. В настоящее время в СССР выпускаются фильтры, практически свободные от микроэлементов, но пока они малодоступны для широкого использования. Общим недостатком всех типов планшетов является неодинаковая эффективность улавливания оседающей пыли по сравнению с реальной подстилающей поверхностью.

11.6.1.3. Суммарные выпадения

Для отбора проб суммарных выпадений можно использовать полиэтиленовый или эмалированный бак, который выставляется на метеоплощадке на деревянный стол высотой 1—1,5 м и не убирается во время выпадения осадков. В северных районах, где снег на полях лежит достаточно долго, удобно в качестве планшета пользоваться снежным покровом. Отбор проб производится на открытых плоских участках поля или больших полянах. Снег отбирается полиэтиленовой трубкой с заостренными концами на полную глубину снежного покрова. В качестве тары используются полиэтиленовые мешки. Недопустимо попадание в пробу снега комочков почвы. Для составления суммарной пробы объединяется снег на пяти точках на выбранной площадке.

11.6.2. Методика спектрального определения содержания тяжелых металлов в атмосферных выпадениях

Для определения содержания металлов в атмосферных выпадениях удобно пользоваться методом эмиссионного спектрального анализа. Содержание ТМ в выпадениях в большинстве случаев бывает ниже чувствительности прямого спектрального определения. Поэтому для повышения чувствительности необходимо концентрирование пробы. При определении содержания металлов в суммарных атмосферных выпадениях анализируются растворимая и нерастворимая осадками части выпадений. Поэтому ниже мы остановимся на предварительной подготовке и анализе растворимых и нерастворимых форм металлов в пробах дождя и снега, сухих выпадений (фильтры ФПП) и суммарных выпадений (снежный покров).

Для разделения растворимых и нерастворимых форм проб осадков фильтруются, затем осадок вместе с фильтром высушивается и разлагается при температуре 400°C, а в фильтрат для консервации добавляется соляная кислота из расчета 1 мл 4 н. HCl (марка ос.ч.) на 100 мл фильтрата. Наиболее простым методом концентрирования небольших по объему проб является частичное выпаривание, которое проводится в кварцевых тиглях на водяной бане. Добавленная ранее в фильтрат кислота предотвращает сорбцию ТМ на стенках сосуда как при хранении, так и при выпаривании. Объем концентрата, как правило, составляет 1 мл.

Пробы суммарных выпадений растапливаются в чистой эмалированной посуде, измеряется объем воды и pH раствора. Весь объем фильтруется через фильтр, сливается в одну колбу, азбатовывается. Затем из фильтрата берется aliquота 200 мл для определения металлов, находящихся в растворимых формах, консервируется соляной кислотой (2 мл 4 н. HCl) и упаривается до 1 мл.

Осадок вместе с фильтром высушивается и разлагается в муфельной печи при температуре 400°C. Зола взвешивается и для

определения металлов, находящихся в нерастворимых формах, берется навеска в 1 мг.

Для концентрирования проб сухих выпадений от экспонированных фильтров ФПП отделяется марля, а фильтрующая ткань озоляется. Определение содержания металлов в выпадениях проводится методом спектрального эмиссионного анализа.

II.6.2.1. *Ход анализа*

Подготовленные для анализа жидкие пробы растворимых форм ТМ и эталонные растворы наносятся по одной капле (0,2 мл) на поверхность плоских угольных электродов, предварительно покрытую лаком (4%-ный раствор полистирола в ацетоне) и одной каплей раствора хлористого натрия концентрацией 3 г/л. Для предохранения пробы от разрушения в момент зажигания заряда на высохшую поверхность наносится по капле лака. Капли проб и эталонов наносятся градуированной пипеткой (в 1 мл—50 капель).

Для определения содержания металлов в «сухих» пробах (нерастворимые формы ТМ) на электроды последовательно наносятся 2 капли 4%-ного лака, 1 капля 1%-ного лака, 1/4 мг пробы (отвешивается 1 мг пробы и делится на 4 части), 1 капля 1%-ного лака, 1 капля раствора хлористого натрия, 1 капля 1%-ного лака. Каждая последующая капля наносится после высыхания предыдущей, и только проба наносится на влажный электрод.

II.6.2.2. *Условия съемки*

При спектральном определении содержания ТМ в сухих и жидких пробах выпадений служит дуга переменного тока при силе тока 3,5 А, экспозиция составляет 30 с. В качестве спектрального прибора используется спектрограф с дифракционной решеткой ДФС-8. Относительная среднеквадратичная ошибка метода составляет $\pm 20\%$ при чувствительности метода 10^{-9} — 10^{-10} г на электроде.

II.6.2.3. *Расчет плотности потока тяжелых металлов*

Расчет плотности суммарных выпадений металлов (P) для жидких (P_p) и сухих (P_n) проб производится по следующим формулам:

$$P \doteq P_p + P_n, \quad (\text{II.6.1})$$

$$P_p = \frac{CV \cdot 10^{-2}}{S_n}, \quad (\text{II.6.2})$$

$$P_n = \frac{C_m \cdot 10^{-5}}{S_n}, \quad (\text{II.6.3})$$

где P_p — плотность выпадения металлов в растворимых формах $г/(м^2 \cdot сут)$; P_n — плотность выпадения металлов в нерастворимых формах $г/(м^2 \cdot сут)$; C — концентрация определяемого металла (мкг/мл) в растворимых формах, определенная по градуировочному графику с учетом концентрирования; C' — массовая доля определяемого металла (мкг $^{-1}$) в нерастворимых формах, определенная по градуировочному графику; S — площади (см 2), с которой отбирается проба снега или площади экспонируемого планшета, или площадь дождя — сборника; V — объем (мл) талого снега или отборной пробы дождя; n — число суток с начала образования снежного покрова либо экспонирования планшета или осадкосборника.

В случае отбора единичных осадков $n=1$ и выпадения считаются за время выпадения дождя или снега.

Об организации работ в спектральных лабораториях и об определении металлов в почве и растениях спектральным методом можно прочесть дополнительно в [2, 4, 7, 9, 12, 15].

ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ИНСТИТУТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

ТРУДЫ

ВЫПУСК 2(41)

Т. Н. ЖИГАЛОВСКАЯ, Э. П. МАХОНЬКО, А. И. ШИЛИНА,
В. В. ЕГОРОВ, С. Ю. МАЛАХОВ, Р. И. ПЕРВУШИНА

МИКРОЭЛЕМЕНТЫ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ И АТМОСФЕРЕ

Серия «ЗАГРЯЗНЕНИЕ
ПРИРОДНЫХ СРЕД»

Под редакцией
кандидатов физ.-мат. наук
Т. Н. ЖИГАЛОВСКОЙ и С. Г. МАЛАХОВА



МОСКОВСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО ЦЕНТРА
МОСКВА — 1991

Глава IV. КОНЦЕНТРАЦИИ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА И МЕТОДЫ ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

§ 1. Общие сведения о загрязнении атмосферного воздуха микроэлементами

Тяжелые металлы, являющиеся микроэлементами, входят в состав атмосферных аэрозолей. Поскольку концентрации микроэлементов в атмосферном воздухе у поверхности земли много меньше весовых концентраций пыли, макроэлементы являются небольшой составной частью атмосферных аэрозолей. Последние выступают в роли носителей микроэлементов. С другой стороны, по-видимому, существуют отдельные частицы аэрозоля, целиком или большей частью состоящие из одного или нескольких микроэлементов и их соединений. Подобные частицы коагулируют с частицами основного аэрозоля.

Рассмотрим основные физико-химические свойства атмосферных аэрозолей.

По данным работы [28], в континентальных аэрозолях, содержащихся в воздухе над территорией СССР, основной макрокомпонентой являются сульфаты (SO_4^{2-}) и гидрокарбонаты (HCO_3^-). При этом считают, что гидрокарбонаты могут иметь почвенное происхождение. Большинство же сульфатов имеет промышленное происхождение. Сульфаты и гидрокарбонаты в континентальных аэрозолях в сумме составляют около 80%, основную массу оставшейся части (15—20%) составляют хлориды. В аэрозолях приморских районов гидрокарбонаты составляют всего около 20%, а хлориды ~ 80% [25].

Химический состав осадков является интегральной характеристикой загрязнения нижней тропосферы. Осадки имеют в своем составе следующие компоненты (над континентом):

- 1) макроколичества анионов: $SO_4^{2-} \approx 3—11$ мг/л, $HCO_3^- \approx 1—9$ мг/л, $Cl^- \approx 2$ мг/л;
- 2) макроколичества катионов: $Ca^{2+} \approx 4,6$ мг/л, $Na^+ \approx 1$ мг/л, $K^+ < 1$ мг/л, $Mg^{2+} < 0,5$ мг/л;
- 3) микроколичества практически всех металлов концентраций порядка $3 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-8}$.

Размеры атмосферных аэрозолей находятся в пределах от нескольких микрон до тысячных долей микрона. Максимум распределения счетной концентрации аэрозольных частиц по размерам в нижней тропосфере лежит в области сотых долей микрона [32]. Закон распределения частиц атмосферных аэрозолей в зависимости от радиуса можно аппроксимировать степенной зависимостью (для $r > 0.1$ мкм)

$$\frac{dN}{d(\lg r)} = Cr^{-\beta},$$

Здесь N — число аэрозольных частиц в единице объема, C — постоянная, r — радиус частиц, $\beta \approx 3$ [32].

В ряде случаев распределение аэрозолей по их размерам аппроксимировалось логарифмически нормальным законом.

В случае локальных выбросов аэрозолей в атмосферу попадают частицы радиусом более 20 мк, которые выпадают на поверхность земли вблизи источника. Частицы же размером микрон и меньше могут распространяться в атмосфере на большие расстояния (в десятки тысяч километров и более).

Данные измерений содержания микроэлементов в атмосфере значительно меньше, чем данных о содержании макрокомпонент. Большинство работ посвящено изучению макрокомпонентного состава аэрозолей [21, 22, 24, 26, 31, 32], и лишь в последнее десятилетие появились данные о содержании микропримесей в атмосферных аэрозолях. Поскольку для изучения макрокомпонентного и микрокомпонентного состава аэрозолей требуется применение различной аппаратуры и различных методов анализа, эти исследования проводятся, как правило, независимо друг от друга различными авторами [9, 10, 14, 16, 34—36, 41, 46, 47, 50, 53, 54, 56, 57, 60, 61]. Это снижает ценность полученной информации, так как практически невозможно сделать уверенного вывода о форме химических соединений, входящих в состав аэрозолей, о свойствах частиц, являющихся носителями тех или иных микроэлементов.

Далее дан краткий обзор основных данных о концентрациях микроэлементов в атмосферном воздухе вблизи земли. Следует отметить большой диапазон колебаний рассматриваемых величин.

Концентрации микроэлементов в воздухе значительно различаются в зависимости от географического положения пункта отбора проб и климатических условий [10—14, 16]. Наблюдается также зависимость этих концентраций от свойств аэрозолей [11] и от конкретной метеорологической ситуации, например, значительное повышение концентраций микроэлементов, связанное с прохождением зоны фронта [6, 13].

Данные о содержании микроэлементов в атмосфере приведены также в [34, 35, 38, 43, 44, 55, 58, 59]. В табл. IV-1 даны концентрации микроэлементов, полученные разными авторами. Данные очень разнородны: это средние значения по районам, распро-

Концентрации микроэлементов ($\mu\text{г}/\text{м}^3$) в атмосфере

	Pb	Mn	V	Al	Cu	Fe
Япония (Осака)		310—910	60—310	1500—1300		1800—12 900
США (сельская местность) Чикаго		0,6—250	2—18	8—2170	5—1070	20—13800
США	24—6000		5—80		17—10000	
США (Чикаго)		100—900	2,2—120	480—3200		
Ряд районов США	22—1100	5—70			60—160	150—1430
Ряд районов Англии	980		25		100	
Тропосфера (3 5 км) над США						330
Канада (Торонто)						530—5400
США (сельская местность)	0,35—110	0,025—2,6				1—25

женным вблизи от источников загрязнений и вдали от них, результаты анализа проб, отобранных из воздуха в больших городах [33, 34], городах средней величины и в тропосфере [52]. В [38] приводят значения концентраций, полученные в воздухе сельской местности в 5 км от Найлса, штат Мичиган. Пробы отбирались в течение 34 ч. Значения концентраций элементов сравниваются с аналогичными измерениями, проведенными в Чикаго [51]. Из табл. IV.1 видно, что концентрации всех элементов варьируют в пределах одного—трех порядков в зависимости от места и времени взятия пробы. В воздухе крупных промышленных городов, таких, как Чикаго, Осака [31, 34, 58], концентрации элементов имеют близкие значения, на два-три порядка выше, чем в местах, удаленных от источников загрязнения [38]. При усреднении во времени и по площади эта разница уменьшается [49]. В табл. IV.1 приведены концентрации лишь отдельных микроэлементов в атмосферном воздухе. В [58] приводятся концентрации в приземном слое воздуха 36 элементов, в том числе такого токсичного элемента, как Hg. Измерения при этом производились в четырех различных пунктах г. Осака. В табл. IV.2 приведены некоторые результаты этих измерений для представления об уровнях загрязнения атмосферного воздуха отдельными элементами.

Из табл. IV.1 и IV.2 видно, что более высокие концентрации (в $\mu\text{г}/\text{м}^3$) имеют место для элементов, содержащихся в больших количествах в земной коре (табл. IV.6). Например, наблюдается высокое содержание железа, алюминия, магния, меди, более низ-

Таблица IV.1

в различных районах северного полушария

№	Ti	Al	Zn	As	Источники
30—65	27		350—1100	1,5—5	[58] [38]
20—50	40—190	600—2400	1—1100	1—2,4	[51] [44] [53]
2—17		94	300		[49] [55]
			17	0,054	[52]
			170—510	12—88	[52]
1—1003	0,04—0,10	0,004—3,1	0,1—4,5	0,01—1,3	[58]

кое — марганца, цинка, титана, ванадия, хрома, никеля, еще меньше содержание вольфрама, галлия, индия, ртути, тория.

Однако соотношения между концентрациями элементов, более

Таблица IV.2

Концентрация некоторых микроэлементов
в приземном слое воздуха в г. Осака [58]

Микроэлемент	мг/м ³	Микроэлемент	мг/м ³
Al	1600—6200	In	0,27—1,6
Sc	0,1—1,2	W	4,6—16
Co	2,0—5,9	Hg	1,1—2,2
As	25—190	Tb	0,9—4,0
Br	62—610	Ta	0,11—0,47
Rb	8,9—36	Cs	0,76—2,0
Cd	15—36	Ba	34—600

и менее распространенных в природе, а также концентрациями макроэлементов и микроэлементов в воздухе городов значительно отличаются от аналогичных соотношений в земной коре. Для некоторых элементов такое отличие имеется и в воздухе районов, удаленных от источников загрязнений. Например, по результатам измерений [23, 39, 40, 42] содержание свинца над океаном превышает естественный уровень в 100 раз, а в городском воздухе — в 10 000 раз. Аналогичные данные получены в [48, 59] и для

других элементов, например, для кадмия, содержание которого в некоторых случаях превышает естественные уровни в 100 и более раз [43].

С гигиенической точки зрения важно знать, какими могут быть концентрации элементов в воздухе городов в зависимости от действия источников загрязнения, климатического пояса, метеорологических условий, времени года, на какое расстояние от источников загрязнения возможен перенос, изменяются ли концентрации элементов в воздухе вследствие антропогенных причин вдали от промышленных объектов, например над океаном [37], на высотах 3—6 км и более над землей [52]. Для ответа на эти вопросы нами производились измерения концентраций элементов над территорией Советского Союза, а также в полярных районах и над океаном.

Зависимости концентраций микроэлементов в воздухе от интенсивности действия источников, их отдаленности от места взятия проб, климатических, метеорологических условий могут быть получены на основании достаточно большого количества данных. При этом в большинстве случаев необходимо анализировать пробы небольшого веса — доли миллиграмма или миллиграммы. Набор элементов в пробах, как видно из табл. IV.1 и IV.2, может быть самым разнообразным. Концентрации их составляют сотни и тысячные доли процента. Все эти условия предъявляют к выбираемому методу анализа требования, не менее жесткие, чем при анализе природных вод. Метод анализа должен быть по возможности не трудоемким, с высокой абсолютной чувствительностью.

Из имеющихся аналитических методов этим требованиям наиболее отвечают методы активационного анализа и эмиссионной спектроскопии. Каждый из них при применении к анализу проб атмосферной пыли имеет свои достоинства и недостатки. Метод эмиссионной спектроскопии [14], использованный в [11, 12], не дает возможности получить данные о содержании такого большого числа элементов из одной пробы как метод активационного анализа. Но с помощью метода эмиссионной спектроскопии пробы атмосферной пыли при протяжке воздуха через фильтр можно проанализировать за протяженности нескольких минут. Производительность метода более высокая, чем в случае активационного анализа. Сравнительно проста в обращении применяемая аппаратура.

Нами применялся метод эмиссионного спектрального анализа. Наряду с выбором метода анализа очень важными являются вопросы о методах отбора проб, а также о применяемых при отборе установках и материалах. Поэтому, прежде чем рассматривать метод анализа и результаты измерений, опишем применяемые нами методы отбора проб и свойств фильтров, на которые отбирались пробы.

§ 4. Концентрации некоторых металлов в приземном слое атмосферы над территорией СССР

В работах, проведенных в ИЭМ, при отборе проб в приземном слое (на высоте 1,5 м) применялись фильтровентиляционные устройства с фильтрами типа ФПП-15 площадью 0,3—0,5 м² [8]. Время пропускания воздуха составляло 24 ч. Фильтры с отобранной пробой извлекались в муфельной печи в платиновых тиглях при температуре не выше 400°C. Среднемесячные пробы приготавливались смешением золы, полученной при прожигании фильтров в точными пробами. Полученная зола взвешивалась на аналитических весах. Угольные электроды обрабатывались так же, как при анализе природных вод. Поверхность электродов предельно покрывалась тонкой пленкой лака, затем наносилась капля хлористого натрия. После высыхания хлористого натрия на электрод снова наносилась капля лака. На влажную поверхность электрода, на которой еще не совсем высох лак, помещалась навеска золы (0,25 мг). Поверх навески золы наносилась еще капля лака.

Перед началом измерений производились холостые опыты, чтобы определить содержание анализируемых элементов в применяемых реактивах и каждой партии неэкспонированных фильтров. Данные о содержании металлов в тканях фильтров были приведены ранее. Наличие загрязнений в тканях фильтров и значительные колебания концентраций определяемых элементов на поверхности фильтра не позволяют анализировать пробы при малом времени отбора и низких концентрациях.

Описанным ранее методом были получены данные о содержании микроэлементов в ряде пунктов Советского Союза. Эти данные частично приведены в табл. IV.5 [10, 12]. Как видно из табл. IV.5, наиболее низкие концентрации элементов наблюдаются в северных районах СССР и в южном полушарии над океаном. В северных пунктах над материком концентрации микроэлементов

Таблица IV.5

Среднегодовые концентрации микроэлементов ($\mu\text{г}/\text{м}^3$) в воздухе

Пункт	Год	Fe	Al	Cu	Pb	Mn	Cr	Ni	Cd	Su
г. Желатина (Повая Земля)	1968	4,30	1,05	1,61	0,23	0,25	0,34	0,38	0,29	0,17
г. Даксин		24,1	8,30	2,90	0,87	1,11		1,32	0,39	0,53
Салехард		21,1	7,90	2,90	1,26	1,73	1,60	2,36	5,30	0,59
Архангельск		1750		43	19	70	45	46	60	9
Севастополь		162	129	13,5	8,29	13,9	6,06	16,2	2,34	4,06
Восток г. Москва	1970	3000		5,8	75	52	70	33	64	16
Петропавловск-Камчатский	1968	301	85,8	15,5	15,5	11,8	2,74	5,93	0,55	2,81
Магадан		403	80,6	13,1	13,8	20,7	5,37	7,21	4,23	4,53
Якутск		280		25,0	25,0	11,0	4	4	5	6
Тель-Шань	1967			2430	237	377	94,0	96,5	176	71,5
Новокузнецк				639	364	203	115	146	532	55,2
Ташкент	1968			1499	103	434	123	71,6	61,9	65,7
Ташкент	1967			110	320	273	136	158	230	91,0
Семипалатинск	1968			78,4	78,4	141	10,7	138	133	32,0
Иркутск				67	634	174	69,1	67,7	96,1	37,7
Над океаном				67	76	34		13	22	16
Умеренные широты северного полушария	1958	175	121	12,2	4,45	7,86	7,18	2,87	1,96	3,82
Южные широты		7,01	12,0	2,05	1,01	0,24	0,23	0,35	0,14	0,27

тов в четыре—пять раз выше, чем в воздухе на м. Жезыня и в южном полушарии над океаном. Еще выше концентрации в приморских городах — Севастополь, Петропавловск-Камчатском, Магадане. Они близки к концентрациям элементов в воздухе над океаном в северном полушарии. Концентрации всех микроэлементов в воздухе над континентом на порядок и более превышают соответствующие концентрации в воздухе приморских городов. Это видно на примере таких пунктов, как Тянь-Шань, Налас-барек, Ташкент, Семипалатинск. Причиной более низких концентраций элементов в воздухе пункта на Новой Земле является отсутствие источников искусственного и естественного загрязнения на этой широте и наличие снежного покрова на протяжении большей части года.

Таблица IV.5

Среднегодовые концентрации микроэлементов в приземной слое атмосферы в весовых процентах по отношению к неорганической пыли

Район СССР	Год	Fe	Cu	Pb	Ni	Cr	Ti	Sm	V	Ca	Mg	Zn
Северные побережья	1968	1,0	0,05	0,04	0,06	0,06	0,03	0,010	0,005	0,002	0,06	
	1969	2,0	0,019	0,09	0,07	0,11	0,04	0,020	0,000	0,003	0,06	0,37
	1970	1,8	0,20	0,10	0,40	0,15	0,12	0,012	0,030	0,020	0,07	0,51
Центр ЕТС	1968	2,7	0,13	0,04	0,12	0,10	0,23	0,020	0,05	0,026	0,15	
	1969	1,8	0,13	0,06	0,08	0,140	0,17	0,010	0,08	0,018	0,06	0,28
	1970	1,3	0,12	0,11	0,23	0,200	0,17	0,012	0,06	0,021	0,07	0,45
Прибалтика	1968	2,6	0,05	0,09	0,03	0,090	0,09	0,03	0,03	0,017	0,10	
	1969	1,3	0,12	0,09	0,21	0,11	0,07	0,02	0,05	0,007	0,02	0,48
	1970			0,10	0,13	0,10	0,09	0,04	0,06	0,020	0,09	0,50
Юг (Баку, Аральск)	1968	1,0	0,04	0,08	0,04	0,020	0,12	0,020	0,02	0,010	0,25	
	1969	1,0	0,04	0,07	0,03	0,050	0,09	0,02	0,06	0,022	0,05	0,10
	1970		0,04	0,06	0,02	0,030	0,08	0,04	0,02	0,012	0,05	0,16
Западный Сибирь	1968	2,5	0,04	0,04	0,04	0,030	0,19	0,016	0,015	0,030	0,05	
	1969			0,09	0,03	0,070	0,04	0,010	0,020	0,010	0,05	0,26
	1970	3,4	0,05	0,09	0,05	0,060	0,35	0,02	0,040	0,090	0,10	0,16
Средняя Азия	1968	2,4	0,04	0,04	0,018	0,011	0,29	0,02	0,01	0,015	0,20	
	1969			0,01	0,020	0,030	0,11	0,05	0,03	0,012	0,05	0,26
	1970		0,06	0,03	0,020	0,030	0,20	0,01	0,03	0,010	0,06	0,20
Восточная Сибирь	1968	2,6	0,04	0,12	0,04	0,016	0,13	0,03	0,01		0,08	
	1969			0,12	0,02	0,016	0,06	0,02	0,01	0,007	0,05	0,22
	1970	2,9	0,12	0,10	0,05	0,060	0,04	0,01	0,01	0,009	0,05	0,25
Дальний Восток	1968	2,0	0,05	0,11	0,03	0,02	0,20	0,020	0,04	0,026	0,05	
	1969	2,0	0,05	0,05	0,03	0,04	0,21	0,007	0,04	0,068	0,04	0,30
	1970	2,5	0,10	0,11	0,05	0,05	0,36	0,010	0,04	0,069	0,06	0,33
В арктич. коре		4,2	0,01	0,0016 ≈0,002	0,02	0,03	0,04	0,020	0,02	0,0005	0,10	0,02

Представляет интерес сравнение концентраций микроэлементов в атмосфере со средними концентрациями этих элементов в земной коре. Такое сравнение возможно при условии осреднения концентраций элементов в атмосфере по времени и ряду пунктов данного географического района и при выражении этих содержаний в весовых процентах по отношению к неорганической пыли. Повышение осредненных концентраций в воздухе, по-видимому, следует отнести за счет действия антропогенных факторов.

Среднегодовые значения концентраций для различных районов СССР приведены в табл. IV.6. В табл. IV.7 дано отношение

Таблица IV.7

Отношение средних концентраций элементов в воздухе к средним концентрациям в земной коре (в весовых процентах к весу пыли)

Район СССР	Cd	Pb	Ni	Cr	Zn	Sn
Центр ЕТО	13	20	6	1	52,0	
	13	30	4	3	36,0	13
	12	55	12	7	40,0	23
Прибалтика	5	45	1,5	3	31,0	
	12	45	10	4	15,0	24
		50	7	3	40,0	45
Юг (Баку, Аральск)	4	40	2	1	20,0	
	4	35	1,5	15	110,0	5
	4	25	1	10	25,0	8
Западная Сибирь	4	20	2	10	60,0	
		45	1,5	23	20,0	13
	5	45	2,5	20	190,0	8
Средняя Азия	4	20	1	1	96,0	
		5	1	1	25,0	13
	6	15	1	1	20,0	10
Восточная Сибирь	4	50	2	7		
		60	1	5	13,0	11
	12	70	2,5	20	18,0	12
Дальний Восток	5	55	1,5	1	52,0	
	5	25	1,5	1	180,0	15
	10	55	2,5	2	160,0	17

средних концентраций некоторых элементов к средним концентрациям этих элементов в земной коре (в весовых процентах к весу пыли). Из табл. IV.6 видно, что средние концентрации элементов Fe, Mn, Sn, Ti, V, выраженные в весовых процентах, не превышают аналогичных концентраций тех же элементов в земной коре. Заметно превышение атмосферных концентраций над фоновыми для элементов Cd, Pb, Zn, Cr, Ni, Cu. Из табл. IV.6 и IV.7 видно, что наиболее высокие превышения атмосферных кон-

центраций над кларковыми характерами для меди и шпекла в центре Европейской территории СССР, свинца — в Восточной Сибири, хрома — в районе Западной Сибири, цинка — в районе Прибалтики, кадмия — на дальневосточном побережье.

На рис. IV.1 приведены превышения относительного содержания хрома и свинца в атмосферной пыли над соответствующими кларковыми уровнями. При этом рассматривается приземный слой воздуха в городах различной величины, а также на различных удалениях от источников выбросов в сельской местности и над океаном. Предполагается, что интенсивность выброса микроэлементов в атмосферу в первом приближении пропорциональна населению городов. Рассматриваются три группы городов: небольшие города (до 100 тыс. жителей), города средней величины (100—300 тыс.) и большие города (более 300 тыс.). Следует отметить, что наши измерения проводились на метеостанциях, т. е., как правило, на окраине городов.

На рис. IV.2 приведены аналогичные данные в абсолютных единицах концентрации. Рис. IV.1 и IV.2 получены по данным наших опубликованных работ [9, 10, 12, 41]. Несмотря на быстрое уменьшение содержания элементов в воздухе по мере уменьшения городов, а также в местах, удаленных от источников загрязнения, какими являются полярные области и акватории океанов, средние весовые концентрации таких элементов, как свинец, кадмий, хром, как правило, выше, чем соответствующие концентрации этих элементов в земной коре. Это означает, что аэрозоли оксидов или солей металлов переносятся на большие расстояния от источников загрязнения практически в пределах всего полушария. Увеличение концентраций металлов в воздухе при приближении к городам и превышение их концентраций над кларковым уровнем в воздухе районов, удаленных от источников загрязнения, отмечено также в [49].

Средние значения концентраций металлов, выраженные в весовых процентах по отношению к содержанию неорганической пыли, изменяются в гораздо более узких пределах, чем абсолютные значения. Это обусловлено значительными изменениями содержания пыли в воздухе в зависимости от климатических и метеорологических условий.

Рассмотрим теперь временные колебания концентраций микроэлементов в приземном слое воздуха. Практически во всех пунктах измерений над континентом были зафиксированы сезонные колебания концентраций микроэлементов. При этом максимальные среднемесячные концентрации отличались от минимальных в некоторых случаях почти на порядок. На рис. IV.3 приведены примеры сезонных колебаний суммарных концентраций микроэлементов в приземном слое ряда районов Советского Союза. На рис. IV.4 приведены аналогичные колебания, относящиеся к свинцу. Оба рисунка показывают, что годовой ход концентраций микроэлементов в приземном слое воздуха существенно различен для разных районов. Однако в большинстве случаев уровни концент-

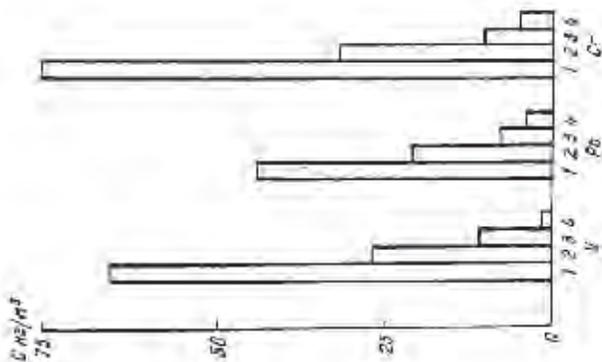


Рис. 102. Концентрации микроэлементов в растениях: а — в сосновом бору на территории Спасского Ц.С.С.Р.; б — в сосновом бору на территории Спасского Ц.С.С.Р.; в — в сосновом бору на территории Спасского Ц.С.С.Р.; г — в сосновом бору на территории Спасского Ц.С.С.Р.

1 — в сосновом бору, 2 — в сосновом бору, 3 — в сосновом бору, 4 — в сосновом бору.

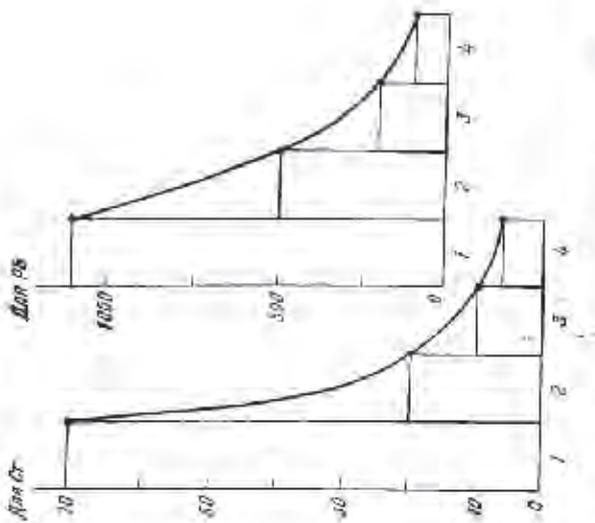


Рис. 101. Средние концентрации микроэлементов в относительных единицах (относительные проценты содержания в шлуде Сг и РВ в лесовому процентному соотношению этих элементов в лесной шлуде).

1 — в сосновом бору, 2 — в сосновом бору, 3 — в сосновом бору, 4 — в сосновом бору.

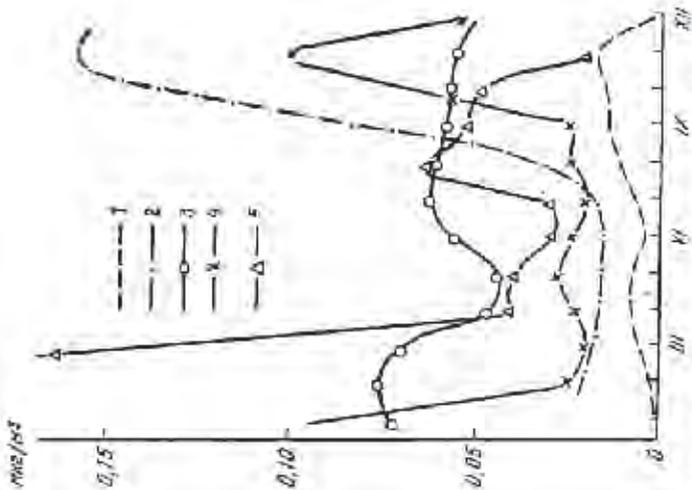


Рис. IV-4. Годовая ход концентрации Рn в приземном воздухе различных районов СССР: 1 — Свердловск, 2 — Мордовия, 3 — Херсон, 4 — прагонецкая Курбань, 5 — кемеровская область. ИЭС за 1965 г.

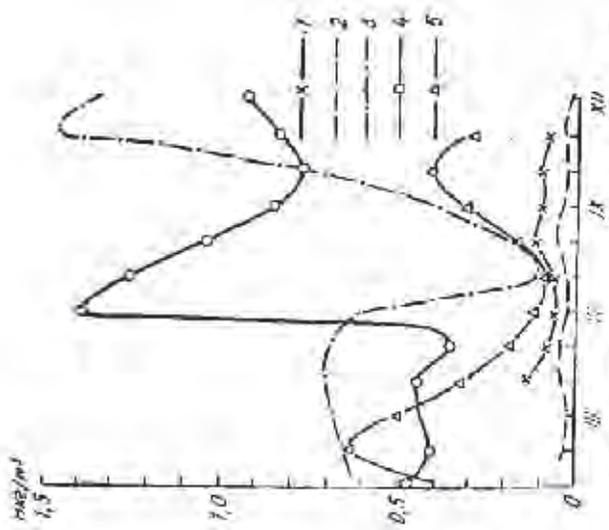


Рис. IV-5. Годовой ход концентраций радионуклидов в воздухе некоторых районов Советского Союза: 1 — Свердловск, 2 — Алдэра, 3 — Магдан, 4 — Мордовия, 5 — Кемеровская область.

раций в зимнее время выше, чем в летнее. Такие сезонные колебания аналогичны поведению радона и продуктов его распада, источником которых является земная поверхность, а также поведению некоторых химических загрязнений, таких, как описаны в [2]. Обычно максимальные уровни загрязнения зимой объясняют большой частотой температурных инверсий в нижнем слое атмосферы, которые препятствуют развитию вертикального турбулентного перемешивания и способствуют скоплению примеси наземного происхождения в приземном слое воздуха. Летом, наоборот, развитый вертикальный турбулентный обмен в атмосфере способствует переносу примеси в более высокие слои и ведет к уменьшению концентраций примеси земного происхождения в приземном слое.

Однако на указанную закономерность могут накладываться особенности временного распределения в течение года интенсивности источников загрязнения и стока. Последним может быть распределение месячных сумм осадков, поскольку выпадение осадков является одним из основных механизмов самоочищения атмосферы. В качестве примера можно указать на рис. IV.5, на котором приведен годовой ход концентрации суммы микроэлементов в приземном слое воздуха и годовой ход осадков в

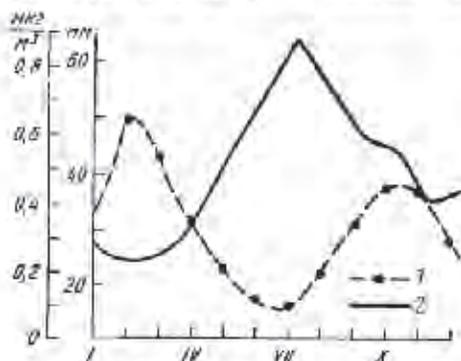


Рис. IV.5. Годовой ход количества осадков (2) и содержания микроэлементов (1) над Куйбышевом

Куйбышеве. Годовой ход атмосферных осадков в Куйбышеве способствует более интенсивному вымыванию микроэлементов летом по сравнению с зимой и тем самым как бы «усиливает» годовой ход концентрации микроэлементов, вызванный сезонными колебаниями интенсивности вертикального турбулентного перемешивания. Поэтому приведенные на рис. IV.5 данные говорят об отчетливом годовом ходе изменения концентраций микроэлементов в приземном слое воздуха с максимумом в осенние и зимние месяцы. Аналогичные данные получены для Хорога и некоторых дру-

гих пунктов СССР. Для ряда других районов распределение атмосферных осадков в течение года может, наоборот, смазывать сезонные колебания концентраций микроэлементов, вызванные колебаниями турбулентного обмена.

Аналогичным образом сезонные колебания интенсивности поступления в атмосферу того или иного микроэлемента могут влиять на форму и интенсивность сезонных колебаний концентрации этого микроэлемента в приземном слое воздуха.

В главе II было показано, что концентрация микроэлементов в осадках зимой на Европейской территории СССР в большинстве случаев мало отличаются от летних значений, а для Мп летние концентрации оказываются даже больше зимних. На первый взгляд, это кажется противоречащим данным о сезонных колебаниях концентраций микроэлементов в приземном слое воздуха, приведенным выше. Однако это не так. Прямой зависимости между концентрациями примесей в приземном воздухе и в осадках может и не быть. Действительно, концентрация микроэлементов в осадках является функцией интегрального количества этих микроэлементов во всем слое выпадения, а не только в приземном слое воздуха. Особенно важно количество этих микроэлементов в облачном слое, где происходит основной захват аэрозолей на будущие дождевые капли. В слое же выше 0,5 км сезонные колебания концентраций примеси наземного происхождения имеют противоположный ход по сравнению с аналогичными колебаниями у поверхности земли (гл. V, § 1).

С другой стороны, концентрация аэрозольных примесей в осадках зависит не только от их количества в атмосферном воздухе, эти концентрации, как правило, уменьшаются с увеличением интенсивности осадков или от количества выпавших осадков. Скорость удаления аэрозолей из атмосферы также зависит не только от концентрации этих аэрозолей в атмосферных осадках, но, как правило, зависит также и от общего количества выпадающих осадков. Таким образом, перечисленные факторы могли изменить сезонные колебания концентраций микроэлементов в осадках по сравнению с сезонными колебаниями этих микроэлементов в приземном слое воздуха.

Представляет интерес рассмотреть сезонные колебания относительных концентраций микроэлементов в приземном слое воздуха, т. е. концентраций, отнесенных на единицу веса пыли. При этом следует отметить следующие интересные факты. Были обнаружено, что относительные (т. е. выраженные в промиллях) средние значения концентрации суммы элементов на северном побережье СССР имеют максимальные значения в летнее время, что может быть связано с приносом этих элементов из южных районов и сезонном инаугации. Исключением составляет Архангельск. В воздухе Архангельска имеется явно выраженный максимум относительной концентрации для марганца и свинца в зимнее время. На дальневосточном побережье максимальные зна-

чения концентраций отмечаются в летнее время и совпадают по времени с ветрами, дующими с океана на сушу.

Ранее были рассмотрены временные колебания концентраций микроэлементов, осредненных по сравнительно большому промежутку времени — месяцу. Концентрации, осредненные за меньшие промежутки времени, претерпевают большие изменения. Так, среднемесячные концентрации изменяются в значительно больших пределах, чем среднегодовые. Еще большие изменения концентраций можно наблюдать в зависимости от изменения метеорологических условий при разовом отборе проб. Примером значительного изменения концентраций элементов в воздухе за короткий промежуток времени могут быть данные, приведенные в табл. IV.8, где указаны результаты анализа проб, отобранных на

Таблица IV.8

Концентрации металлов (нг/м³) на высоте 300 м и в зоне фронта и вне ее.
Холодный фронт

	Fe	Ni	Cr	Su
Вне зоны фронта	34 ± 20	0,13 ± 0,10	0,03 ± 0,02	0,5 ± 0,03
В зоне фронта	230 ± 120	4 ± 1	2 ± 1	200 ± 100
Отношение концентраций	≈ 6	30	70	420
	Mn	Pb	Ti	
Вне зоны фронта	0,10 ± 0,06	1,2 ± 0,04	0,01 ± 0,01	
В зоне фронта	1,2 ± 0,2	8,7 ± 3,1	3,2 ± 2,2	
Отношение концентраций	12	7	320	

высоте 300 м на высотной метеорологической мачте в г. Обнинске при прохождении зон фронтов [13]. Время наблюдения около 2 ч. Из табл. IV.8 видно, что изменения концентраций при прохождении фронта для разных элементов не одинаково. Следовательно, носителями этих элементов являются разные аэрозольные частицы, имеющие разное происхождение. Вероятно, это преимущественно частицы антропогенного происхождения, так как отношение концентраций различных элементов значительно отличается от таких отношений для земной коры. Например, содержание железа в земной коре более чем в 400 раз превышает содержание олова, в то же время вне зоны фронта эта величина равна около 70, а в зоне фронта всего 1.

Различия в поведении аэрозолей, несущих разные элементы, выражающееся в неодинаковом повышении концентраций элементов в зоне фронта, может быть обусловлено разными размерами аэрозольных частиц и зависимостью поверхностных свойств частиц от их химического состава. Подобные различия могут быть следствием также разного содержания микроэлементов в разных

воздушных массах. Как будет показано далее (гл. V), эффективность взаимодействия частиц с каплями воды в значительной мере зависит от поверхностных свойств частиц. Эти свойства играют существенную роль также при процессах конденсации и сублимации.

Концентрации элементов в зоне фронта зависят также от вида фронта, что можно видеть из табл. IV.9 [6], где приведены сред-

Таблица IV.9

Средние значения концентраций металлов ($\mu\text{г}/\text{м}^3$) в зоне фронта

Вид фронта	Fe	Cu	Mn	Tl	Pb	Cd	Ce	Ni
Фронт окклюзии	7300	6500	170	1300	400	690	170	180
Теплый фронт	3900	2400	40	230	90	200	Не обнаружен	Не обнаружен
Холодный фронт	400	1200	20	200	20	80	Не обнаружен	Не обнаружен

ние значения концентраций по измерениям в пробах, отобранных с самолета. Пробы отбирались на протяжении 5—30 мин. Из таблицы видно, что наиболее высокие уровни концентраций элементов наблюдаются в зоне фронта окклюзии, наиболее низкие — в зонах холодных фронтов. Пробы отбирались на высотах от 1400 до 3000 м. Осреднение проводилось по результатам анализа проб, отобранных вне зоны фронта и в зоне фронта в разные дни, по пяти-шести опытам. Из этих наблюдений видно, что концентрации элементов изменяются по-разному при переходе из воздушной массы в зону фронта.

Пока трудно давать подробные объяснения, почему в зоне фронта наблюдаются более высокие концентрации микроэлементов, чем вне ее, почему именно в зоне фронта окклюзии эти концентрации максимальны. Для этого не хватает достаточно подробного фактического материала измерений. Однако некоторые предварительные соображения можно, конечно, высказать уже сейчас.

Фронтальные зоны — это бароклинные зоны. Они характеризуются большими градиентами температуры и других метеорологических параметров, нисходящими и восходящими потоками, усиленной турбулентностью. В этих зонах создаются условия для подъема богатого микроэлементами приземного воздуха к более высоким уровням нижней тропосферы, что приведет к увеличению концентраций микроэлементов на этих более высоких уровнях.

Характерной чертой большинства теплых фронтов является медленное восходящее движение воздуха в значительном пространстве над поверхностью фронта [30]. Фронт окклюзии характерен вытеснением теплого воздуха из нижних слоев и его подъемом вверх [30]. В обоих этих случаях также создаются условия для

подъема загрязненного воздуха из нижних слоев атмосферы в более высокие. По-видимому, условия, существующие во фронте окклюзии, с этой точки зрения более благоприятны по сравнению с условиями, существующими в теплом фронте. В холодном фронте, в зависимости от его вида, возможны и нисходящие, и восходящие потоки. Вероятно, в среднем условия переноса примеси в более высокие слои являются при этом самыми неблагоприятными по сравнению с теплым фронтом и фронтом окклюзии.

§ 5. К вопросу о глобальном распределении микроэлементов в приземном слое атмосферы

В последнее время все большее внимание уделяется проблеме глобального загрязнения атмосферы различными ингредиентами антропогенного происхождения. Рассмотрим в связи с этим некоторые характеристики глобального распределения концентрации микроэлементов в нижней тропосфере и попытаемся найти глобальный фоновый уровень загрязнения атмосферы этими микроэлементами. Под глобальными фоновыми концентрациями логично понимать некоторые постоянные уровни загрязнения, относящиеся к равномерному перемешиванию примеси в пределах, по крайней мере, полушария. Тогда всякое превышение над этим уровнем будет характеризовать дополнительное загрязнение от локального или целой группы локальных источников. Глобальный фоновый уровень естественно искать в районах, удаленных от материков, на которых сосредоточено современное промышленное производство. Для характеристики уровней концентраций микроэлементов в приземном слое воздуха, в районах, удаленных от источников промышленного загрязнения, приводится рис. IV.6. Из рисунка следует, что самые низкие концентрации микроэлементов наблюдаются в атмосферном воздухе самого северного пункта (м. Желания), находящегося на о. Новая Земля. Здесь на протяжении пяти лет уровень концентрации всех определяемых металлов оставался практически постоянным. Это обусловлено тем, что на данной широте нет существенных источников искусственного происхождения.

Средние концентрации микроэлементов над океаном вдали от берегов на широтах 0—40° в северном полушарии выше, чем в полярных районах, что, вероятно, является следствием переноса аэрозоля с материков зональными потоками. Средние концентрации над океаном в южном полушарии для большинства металлов ниже, чем в северном, что может объясняться меньшей площадью материков и меньшей эффективностью выбросов промышленных отходов в атмосферу по сравнению с северным полушарием.

Интересно отметить также, что концентрации микроэлементов в тропосфере на высотах более 2—3 км близки к концентрациям в приземном слое атмосферы над океаном при осреднении по достаточно большому числу измерений. Таким образом, наблю-

дается, некоторая аналогия с поведением радона, источником которого является поверхность суши [5]. Известно, что концентрация радона над океаном на один-два порядка ниже, чем над сушей в приземном слое воздуха [17, 18]. Концентрация же радона в тропосфере на высотах 3 км более чем на порядок ниже, чем у поверхности земли [5]. Некоторая аналогия между радона и микроэлементами может быть объяснена тем, что период полураспада инертного газа радона близок к периоду полувыведения аэрозолей из нижней тропосферы.

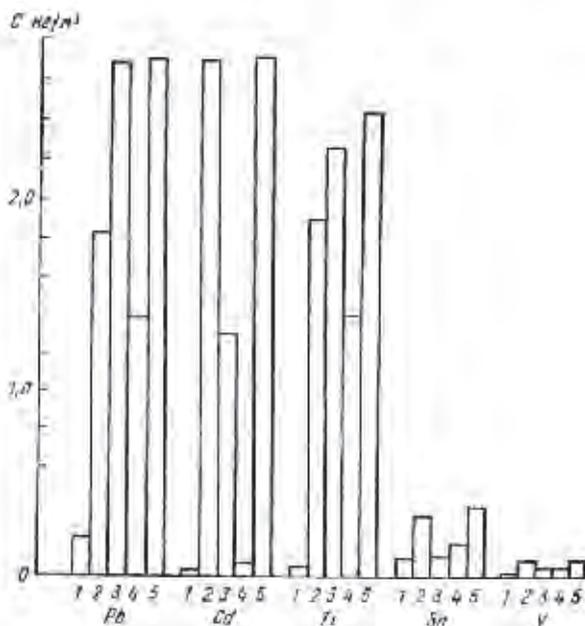


Рис. IV.6. Значения концентраций микроэлементов в районах, удаленных от источников загрязнения:
1 — м. Жданов, 2 — южные районы СССР, 3 — над океаном 10–30° с. ш., 4 — над океаном (0–30° ю. ш.), 5 — 111 км от берегов СССР 16° с. ш. выше 3 км.

При анализе данных, приведенных на рис. IV.6, нам не удалось выделить какой-либо постоянной составляющей загрязнения приземного слоя атмосферы микроэлементами в районах, удаленных от материков, которую можно было бы считать фоновым уровнем загрязнений. Это можно объяснить двумя обстоятельствами. Во-первых, в центральных районах океана и в полярных районах доля загрязнений атмосферного воздуха микроэлементами антропогенного происхождения существенно превышает естественные уровни загрязнений. Действительно, по оценкам [12, 14]

концентрации свинца и кадмия над океаном в приземном слое воздуха в 100 раз превышают естественные (природные) уровни. Во-вторых, при распространении микроэлементов от источников их образования на большие расстояния происходит вымывание их из атмосферного воздуха и диффузия по вертикали, что вызывает уменьшение концентраций микроэлементов в приземном слое воздуха по мере увеличения расстояния от источников загрязнений. Наиболее высокие концентрации микроэлементов в приземном слое воздуха отмечаются в полярных районах (например, на м. Желания), на широте которых лет источяков искусственного и естественного выброса микроэлементов в атмосферу. По-видимому, концентрации микроэлементов в этих районах и можно, по крайней мере, условно, считать глобальным фоновым уровнем.

В табл. IV.10 приведены концентрации микроэлементов в месячных порциях осадков в различных районах земного шара. Дан-

Таблица IV.10

Концентрации микроэлементов (мкг/л) в месячных пробах осадков.
Данные усреднены за 1967—1970 гг.

	Pb	Fe	Mn	Ni	Al	Ca
ЕТС, 40—50° (облачная вода)	2,5	05	11	11	84	20
США, 40—50° (лождь)	34	35	12	4	Не измерялась	21
СССР, 50—60°	5,0	38	30	3,5	8,0	5,0
ЕТС, 80—70°	4,4	43	12	3,0	4,7	4,0
Над океаном, 35—40°	Не обнаружен	1,3	Не обнаружен	0,21	0,20	2,8
Антарктида	Не обнаружен	1,0	0,30	0,30	1,1	0,9

ные, относящиеся к территории СССР, Антарктиде и районам океанов, получены авторами нартонической работы, данные по территории США взяты из [48]. Используя табл. IV.10, можно попытаться рассчитать общее количество некоторых микроэлементов (железа, алюминия и никеля), ежегодно выпадающее с осадками на территорию северного полушария. При этом делается предположение, что удельная концентрация рассматриваемых микроэлементов в осадках над сушей в пределах всего северного полушария одинакова и равна средней концентрации для США и Советского Союза. С другой стороны, предполагается, что над всей поверхностью океанов в северном полушарии концентрация железа, никеля и алюминия в осадках также одинакова и равна среднему значению для четырех дождей, пробы которых отобраны над Атлантическим океаном в ноябре 1968 и в марте 1969 гг. По таким приближенным оценкам, общее выпадение железа, никеля и алюминия на северное полушарие с осадками

составило соответственно $23 \cdot 10^5$, $2,6 \cdot 10^5$ и $3 \cdot 10^5$ т/год. При этом доля выпадающей на океаны оказалась небольшой, колеблющейся от 10% (для железа) до 15% (для никеля). Данные о количестве осадков, выпадающих на материк и океаны, были взяты из [15].

Для сравнения можно указать, что выпадение никеля метеоритного происхождения на поверхность земли в северном полушарии, по данным [45], составило $0,35 \cdot 10^5$ т/год. Эта величина была получена по данным измерений концентрации никеля в годовых слоях ледников на материке Антарктиды.

Данные о выпадении микроэлементов в северном полушарии, приведенные ранее, фактически дают сведения о количестве этих элементов, выброшенных в течение года в атмосферу северного полушария, если считать, что в атмосфере установилось равновесие между выбросом и выведением аэрозолей.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛ. IV

1. Алексеева М. В. Определение атмосферных загрязнений. М., Медгиз, 1959.
2. Волудай Э. Ю., Солякин А. Ф. Влияние метеорологических факторов на загрязнение воздуха в городах Советского Союза. — Сб. «Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы». Л., Гидрометеоиздат, 1971.
3. Белков С. П. Экспериментальное исследование аспирации аэрозолей. Автореферат диссертации. ИЭМ, Обнинск, 1971.
4. Выховская М. С., Гинзбург С. Л., Хализова О. Д. Методы определения вредных веществ в воздухе. М., Медицина, 1966.
5. Газиев Я. Н., Назаров Л. Е., Малахов С. Г. Радиактивные аэрозоли в свободной атмосфере. — Труды ИЭМ, 1971, вып. 7.
6. Гаргер Е. К., Жигаловская Т. Н., Егоров В. В., Киреева Н. М., Матковский Б. М., Шилина А. И. К оценке фоновой концентрации ряда микроэлементов во фронтальных облаках. — Труды ИЭМ, 1972, вып. 2(36).
7. Тернет Е. В. Сравнение задерживающей способности различных фильтрующих материалов при отборе дымов и туманов. — Сб. «Методы определения вредных веществ в воздухе». Под ред. Летавет А. А. — Труды Ин-та гигиены труда и профзаболеваний, 1960.
8. Давыдов Е. Н., Малахов С. Г., Макарько К. П., Машков С. Т. Фильтрующие установки для определения концентрации радиоактивных пыли в приземной атмосфере. — Труды ИЭМ, 1970, вып. 2.
9. Егоров В. В., Жигаловская Т. Н., Малахов С. Г., Шилина А. И. Содержание микроэлементов в приземном слое воздуха над континентом и океаном. — Труды ИЭМ, 1970, вып. 14.
10. Жигаловская Т. Н., Егоров В. В., Малахов С. Г., Шилина А. И., Красноленцев Ю. В. Содержание тяжелых металлов в воздухе некоторых районов СССР. — Сб. «Метеорологические проблемы загрязнения атмосферы». Л., Гидрометеоиздат, 1971.
11. Жигаловская Т. Н., Шилина А. И., Дуванова Ю. А. Физико-химические свойства некоторых твердых высокодисперсных аэрозолей. — Труды ИЭМ, 1971, вып. 14.
12. Жигаловская Т. Н., Егоров В. В., Малахов С. Г., Шилина А. И. Содержание микроэлементов в приземном слое воздуха над континентом и океаном. — Труды ИЭМ, 1971, вып. 14.
13. Жигаловская Т. Н., Киреева Н. М. О содержании некоторых микроэлементов в зоне фронтов во измеренной на высотной метеорологической маяке. — Труды ИЭМ, 1972, вып. 2(36).
14. Зайцев А. Н., Калатинская Н. И., Лалич Л. В., Чайка М. П. Эмиссионный спектральный анализ атомных материалов. М.—Л., Физматгиз, 1960.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ

Вып. 7(112)

1984 г.

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
СПЕКТРОМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ**

Д. В. СМЕРНОВ

Введение

Одной из основных задач, которые должна обеспечивать аппаратура для измерения микроструктуры аэродисперсных образований (аэрозолей), является определение концентрации и функции распределения частиц по размерам. В соответствии с [3] приборы, предназначенные для выполнения этой задачи, будем называть спектрометрами размеров аэрозолей.

На начальных этапах разработки аэрозольной спектрометрической аппаратуры предпочтительнее получили фотоэлектрические методы, основанные на измерении интенсивности излучения, рассеянного одиночными частицами в выбранном направлении. Основанные на этом принципе так называемые фотоэлектрические счетчики (ФЭС) аэрозолей [9] позволяли в реальном времени определить концентрацию частиц в нескольких размерных интервалах. В дальнейшем признание получили другие методы измерения дисперсности аэрозолей, в частности электростатические (ЭСС), основанные на анализе электрических подвижностей частиц, и телевизионные (ТВС), основанные на анализе их изображений. Подробное описание упомянутых методов и соответствующих приборов есть, например, в [11, 15].

С развитием работ по охране чистоты воздушного бассейна и становлением аэрозольной технологии требования к аэрозольной аппаратуре возросли и прежде всего в направлении расширения диапазона измерений, повышения количества анализируемых градаций и точности измерений дисперсного состава аэрозолей. Появились автоматизированные многоканальные системы для изучения дисперсного состава естественного и искусственного аэрозоля [6, 16] и были созданы предпосылки к построению широкодиапазонных спектрометрических аэрозольных приборов, в частности спектрометров размеров аэрозолей.

Для иллюстрации возможностей современной аэрозольной аппаратуры приведем результаты отдельных измерений дисперсного

состава аэрозолей в приземном слое атмосферы при метеорологических ситуациях, характерных для летних антициклонов над Европейской территорией СССР (рис. 1). В интервале размеров частиц 0,0075—1,0 мкм использовался электростатический анализатор, предложенный Уитби [15], в интервале 0,2—30 мкм — модификации лазерного счетчика аэрозолей «Эльтра» [6]. Как следует из этих данных, для получения достаточно полной информации о микроструктуре атмосферных аэрозольных образований целесообразно применять приборы, обеспечивающие диапазон измерения

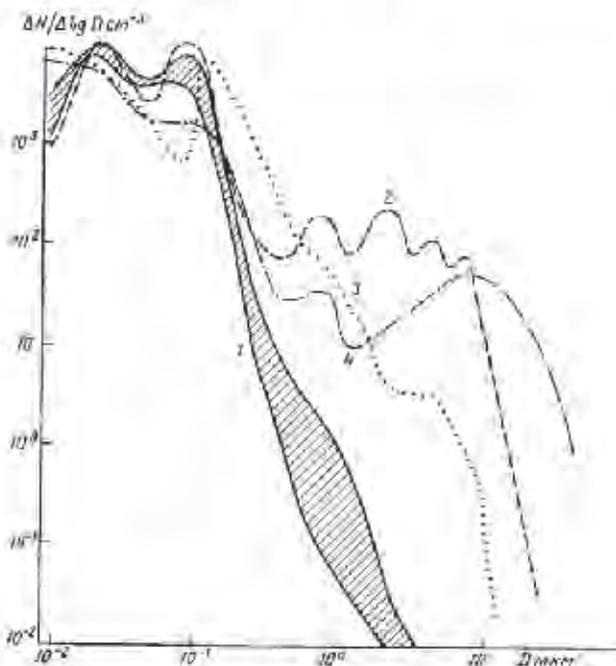


Рис. 1. Дифференциальные функции распределения частиц по размерам, характерные для аэрозолей в приземном слое атмосферы: 1 — при относительной влажности 60—70%; 2 — радиационная дымка; 3 — фотохимическая дымка при восходе солнца; 4 — туман

счетной концентрации не хуже 10^{-2} — 10^5 см⁻³ в интервале размеров соответственно 30—0,01 мкм, способность различать частицы разных размеров на подынтервалах шириной 0,1—0,2 мкм и менее, малую зависимость показаний от материала частицы.

Вместе с тем в отличие от приборов, предназначенных для измерения и анализа оптических, радио- и ядерных излучений (оптические спектрометры, радиоспектрометры, масс-спектрометры,

спектрометры подвижностей ионов и т. п.), терминологии и основные понятия о которых более или менее устоялись [3, 4, 8], подобного анализа и обобщения применительно к спектрометрам аэрозолей практически не имеется.

Настоящая работа является попыткой рассмотреть и обобщить основные понятия и характеристики приборов, предназначенных для измерения дисперсного состава аэрозолей, а также сопоставить основные характеристики существующих спектрометров размеров аэрозолей и рассмотреть некоторые пути их улучшения.

Основные характеристики ФЭС

Приборы для измерения дисперсности аэрозолей принято характеризовать следующими основными параметрами [9, 11]: диапазоном измерения размеров $D_1 \dots D_2$ и концентрации N_i частиц; погрешностью измерения размеров δD_i и концентрации δN_i частиц, где i — текущий размер (номер канала), z — число каналов анализатора. В случае спектрометров размеров аэрозолей, позволяющих получать более детальную информацию о характеристиках частиц, целесообразно рассматривать также характеристики разрешающей и информационной способности. Представляют также интерес сведения о принципе действия, величине счетного (рабочего) объема V , объемном расходе аэрозоля Q через счетный объем и способе формирования последнего. Эти сведения для ряда описанных в литературе спектрометров аэрозолей приведены в таблице.

1. Диапазон измерения размеров — это интервал размеров аэрозолей, в котором обеспечивается паспортная погрешность измерения размера и концентрации частиц.

Нижний предел измерения размера D_{min} , или порог чувствительности, обычно определяется допустимой величиной отношения сигнал/шум ФЭС, равного отношению наиболее вероятного сигнала от монодисперсных частиц размером D_{min} к среднеквадратичному значению амплитуды шумов на выходе фотоприемника

$$A = \frac{U_c}{(\bar{U}^2)^{1/2}} \quad (1)$$

Для существующих схем ФЭС основным источником шумов является дробовой шум фотоприемника

$$\bar{U}^2 = 2 e \bar{U}_{\text{ф.п.}} B R_{\text{э}} M^2 \Delta f, \quad (2)$$

где B — коэффициент шума вторичной электронной эмиссии ФЭУ; M — усиление ФЭУ; Δf — полоса пропускания тракта фотоприемника; $U_{\text{ф.п.}}$ — среднее значение напряжения на нагрузке ФЭУ, вызванного темновым током и постоянной фоновой засветкой фотокатода $U_{\text{ф}}$.

Основные характеристики некоторых

Тип, марка	Страна	Принцип действия	Способ формирования	$D_1 - D_2$, мкм	$V_{\text{сч}}$
АЗ-5	СССР	ФЭС	М	0,4-10	$5 \cdot 10^{-4}$
«Сигма»	>	>	М	0,5-10	$2 \cdot 10^{-5}$
«Аэлит-М»	>	>	М	0,5-32	$8,5 \cdot 10^{-4}$
«Эльтра»	>	>	ОМ	0,35-30	10^{-5}
«Эльтра-2»	>	>	ОМЭ	0,15-10	10^{-5}
«Гамма»	>	>	О	0,07-5	$6 \cdot 10^{-7}$
PC-218	США	>	М	0,5-10	$2 \cdot 10^{-8}$
PC-225/241	>	>	М	0,5-10	$2 \cdot 10^{-4}$
				(0,3-10)	
ASSP-100	>	>	ОЭ	0,5-45	$5 \cdot 10^{-4}$
TSL-3030	>	ЭСС	МЭ	0,0075-1,0	—
«Аспект-10»	СССР	ТВС	ОЭ	2-50	$10^{-5} - 3 \cdot 10^{-2}$

ПРИМЕЧАНИЕ. М — металлический способ формирования счетного объема, Э —

Фоновый сигнал \bar{U}_0 определяется следующими основными факторами: рассеянием излучения на элементах оптической схемы $U_{0, \text{с}}$, на молекулах газа \bar{U}_r в счетном объеме ФЭС, на аэрозольных частицах \bar{U}_a , размером, меньшим $D_{\text{мин}}$. Вклад последнего фактора проявляется, в частности, при измерениях атмосферного аэрозоля, спектр размеров которого описывается обратной степенной зависимостью (рис. 1). Влияние фактора $U_{0, \text{с}}$, по данным [10], сказывается на функции распределения тем существеннее, чем ниже освещенность счетного объема, выше паразитная засветка и чем меньше размер измеряемой частицы.

Для анализа влияния молекулярной компоненты \bar{U}_r на ограничение $D_{\text{мин}}$ сопоставим значения сечений углового рассеяния неполяризованного света на молекулах газа [13]:

$$\sigma_r = \frac{V \kappa^2 (n_r^2 - 1)^2}{2N_r \lambda^4} \frac{PT_0}{P_0 T} \sin^2 \theta \quad (3)$$

и на малой частице диаметром $D_{\text{мин}} < 0,1 \lambda$. Для этих частиц с погрешностью 10% по сравнению с точным решением Ми справедливо релеевское приближение

$$\sigma_r = \frac{\pi^4 D_{\text{мин}}^6}{8 \lambda^4} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 \sin^2 \theta, \quad (4)$$

где N_r — концентрация молекул газа; n_r и m — коэффициенты преломления газа и вещества аэрозольных частиц; θ — угол регистрации рассеянного излучения; P_0 , T_0 и P , T — соответственно нормальные и рабочие значения давления и температуры воздуха.

Из (3) и (4) следует, что уменьшить вклад молекулярной компоненты в фоновую засветку можно введением в счетный объем

спектрометров аэрозолей

$\bar{\Delta D}$ м	$\bar{\Delta N}$ м	Q см ³ /с	R_p, R_T	K	Ссылка
ни	20	20	1,5—9,6	0,3	[14]
7—10	20	6,3	3	2·10 ⁻²	[1]
15	15	1,5	1,5	1,0	
20	30—40	1,5	1,5—3	0,1	[6]
20	20	0,2	5—8	3·10 ⁻²	[7]
20	ни	5·10 ⁻²	1,5—2	10 ⁻⁵	[2]
5—20	»	4,7	1—2,5	0,4	[11]
5	»	4,7; 47	1—3	4·10 ⁻²	[11]
ни	»	50 (900 м/с)	1,8	2·10 ⁻²	[15]
ни	»	70	1,8	4·10 ⁻²	[15]
5	15	—	2—10	10 ⁻²	[12]

электрический, Δ — оптический, ни — не нормировано.

более легкого, чем воздух, газа (уменьшение n_r), уменьшением его давления и, главное, уменьшением счетного объема V . Первые два пути, очевидно, резко усложняют реализацию и эксплуатацию приборов, третий ведет к уменьшению объема выборки информации, что не всегда приемлемо.

В соответствии с рекомендациями [11, 15] целесообразно стремиться к тому, чтобы $\sigma_c > \sigma_r$. Тогда из (3) и (4) для характерных условий ($n_r = 1,000293$, $N_r = 2,543 \cdot 10^{19}$ см⁻³, $m = 1,5$) можно получить простую связь между $D_{\text{мин}}$ и V : $D_{\text{мин}} \geq 6,5 \cdot 10^{-5} V^{1/6}$. Сопоставляя оценки по этой формуле с соответствующими сведениями из таблицы, можно заключить следующее. В случае ФЭС «Сигма» имеется принципиальная возможность снижения порога чувствительности с 0,5 до 0,1 мкм, и наоборот: для лазерного ФЭС «Гамма» нижний предел необходимо поднять на уровень не ниже $D_{\text{мин}} = 0,08$ мкм. Для остальных ФЭС значение $D_{\text{мин}}$ может быть в принципе снижено в 2—3 раза, в частности за счет увеличения освещенности в счетном объеме, установки малошумящих фотоприемников, уменьшения вклада фоновой засветки U_0 .

Остановимся на вкладе компоненты паразитного аэрозольного светорассеяния \bar{U}_i . Пусть функция распределения аэрозольных частиц описывается юнговской моделью

$$N_i = aD_i^{-k}, \quad (5)$$

где D_i — размер, соответствующий середине i -го канала анализа, а k принимает значения от 2 до 5, характеристика сигнал — размер спектрометра — степенной функцией

$$U_i = bD_i^l, \quad (6)$$

где l принимает значение от 1 до 6. Отношение средних размеров частиц в соседних каналах спектрометра обозначим через

$$\rho = \frac{D_l}{D_{l-1}} > 1. \quad (7)$$

С учетом (5)—(7) отношение полезного сигнала U_c от одиночной частицы диаметром D_l к среднему сигналу засветки \bar{U}_s от совокупности частиц диаметром D_{l-1} можно представить в виде

$$\frac{U_c}{\bar{U}_s} = \frac{N_l D_l^l}{N_{l-1} D_{l-1}^l} = \rho^{l-k}. \quad (8)$$

Из (8) видно, что при $l > k$ вклад мелких аэрозольных частиц в увеличение фоновой засветки тем ниже, чем больше показатель характеристики сигнал—размер (6), чем меньше показатель степени в распределении Юнге и чем выше значение ρ (т. е. чем шире каналы анализа). В то же время, согласно (8), сигнал паразитной засветки \bar{U}_s будет превышать полезный сигнал, если $l < k$, причем тем больше, чем выше параметр ρ . Другими словами, использование малочувствительных ФЭС для измерения дисперсности атмосферных аэрозолей может привести к неконтролируемым погрешностям. Например, при $D_{\text{мин}} > 1$ мкм имеет место $l < 2$, а так как показатель в распределении Юнге в среднем близок к 3 [11], то отношение U_c / \bar{U}_s может оказаться много меньшим единицы. Получить количественные значения степени искажения истинного распределения за счет рассмотренного фактора достаточно трудно.

Упростим задачу, предполагая, что вероятности одновременно попадания в счетный объем одной частицы диаметром D_l и нескольких частиц диаметром D_{l-1} подчиняются пуассоновскому распределению. Тогда отношение амплитуд полезного сигнала U_c и импульса помехи, возникшей в результате появления нескольких частиц диаметром D_{l-1} в счетном объеме, будет близко к

$$\frac{U_c}{U_{\text{пом}}} = \rho^l c^{-l}, \quad (9)$$

а относительная вероятность такой помехи равна

$$\frac{P_c}{P_{\text{пом}}} = e^{N_l V} (c^k - 1) \frac{c^l}{\rho^{kl} (N_l V)^{l-1}}, \quad (10)$$

где $c = 2\rho^{-k/2}$ — полная среднеквадратичная амплитуда колебаний числа частиц размером D_{l-1} .

Из (9) и (10) можно получить примерно те же выводы, что и из (8), но следует обратить внимание на один момент. Ранее при

рассмотрении вклада молекулярной компоненты паразитной засветки мы рекомендовали в соответствии с (8) уменьшить размеры счетного объема. Здесь же ситуация несколько иная. Как видно из (10), существует такое значение V , при котором соотношение (10) будет минимальным. Для интервала значений $p=2-1,2$, $k=3-4$ это произойдет при $N_1 V = (2V p^k - 1) (p^k - 1)^{-1} \approx 0,5$. В частности, как следует из (9) и (10), при характерных для практики значениях $N_1 V = 0,1$, $k=4$, $l=2$, $p=1,4$ вероятность ложных импульсов, близких по амплитуде полезному сигналу, будет примерно втрое выше, чем вероятность появления полезного сигнала в первом канале. При малых значениях $p \sim 1$ выражение (10) становится равным $2(N_1 V)^{-1}$, т. е. при очень больших нагрузках вкладом ложных импульсов можно пренебречь.

Таким образом, данные об аэрозольных частицах размером вблизи порога чувствительности ФЭС, особенно если последний калибровался с помощью монодисперсных частиц, могут оказаться некорректными. В общем случае степень некорректности зависит от чувствительности ФЭС и степени его загрузки $N_1 V$, от характеристик аэрозоля. В худшем положении оказываются ФЭС, имеющие низкую чувствительность и использующиеся для измерения аэрозолей с юнговским распределением частиц по размерам.

Верхний предел измерения размеров ограничен погрешностями отбора и аспирации проб аэрозоля в прибор, которые возрастают с ростом размера частиц, а также значительным динамическим диапазоном сигналов от частиц. Например, для ФЭС, где рассеянный свет собирается под углами «вперед» ($0,5-25^\circ$), сечение углового светорассеяния частиц диаметром $0,1-10$ мкм меняется примерно от 10^{-10} до $10^{-6}-10^{-5}$ см², т. е. на 7-8 порядков, а для ФЭС с суммарным углом $60-120^\circ$ — на 5 порядков.

Промышленные многоканальные амплитудные анализаторы (типа АИ-128, АИ-256 и т. п.) имеют динамический диапазон сигналов не более 50-100, специализированные анализаторы с фиксированными порогами — не более 500, что обеспечивает динамический диапазон размеров порядка $10-20$. Целесообразно поэтому введение в тракт фотоприемника нелинейных элементов. В частности, в приборе «Эльтра» (таблица) за счет использования предусилителя с нелинейным усилением динамический диапазон расширен до 100.

Характеристикой, обобщающей сведения о диапазоне измерения прибора, является так называемая рабочая характеристика, иллюстрирующая зависимость амплитуды импульсов (или номера канала анализатора) от размеров частиц определенного физико-химического состава. На практике подобную зависимость чаще всего строят путем калибровки прибора частицами эталонных размеров из известного материала. В качестве примера на рис. 2 приведена экспериментальная рабочая характеристика ФЭС «Эльтра», характеризующая расположение размеров частиц (по диаметру) по номерам каналов анализатора типа АИ-256.

2. Основная погрешность измерения размеров частиц в субмикронном диапазоне размеров с учетом зависимостей (4) и (5) приближенно определяется следующим соотношением:

$$\delta D_i = l^{-1} \sqrt{(\delta N_i)^2 + (4 \delta m)^2 + (\delta V)^2 + (\delta N_H)^2 + (4 \delta \lambda)^2 + (\delta l)^2 + (\delta A_i)^2}, \quad (11)$$

где слагаемые являются независимыми относительными погрешностями, вызванными нестабильностью пороговых устройств δN_i и других преобразующих анализаторов сигналов, изменением

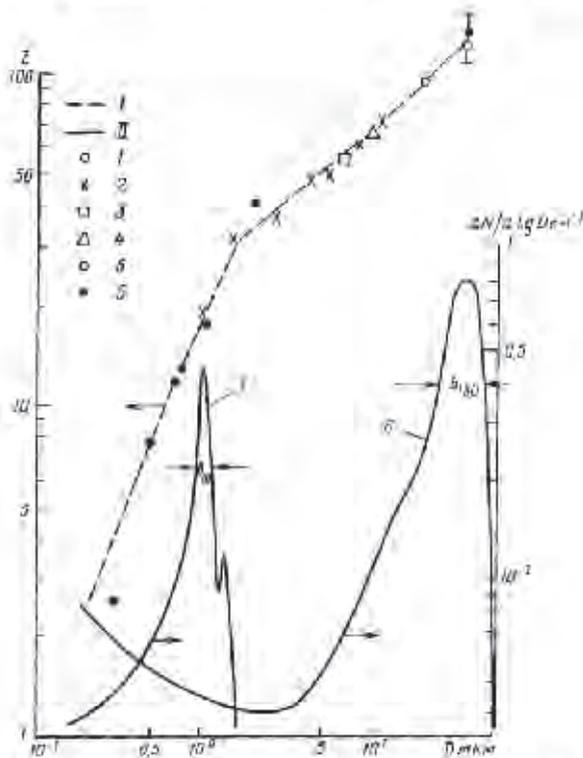


Рис. 2. Рабочая характеристика (I) и реакция лазерного ФЭС «Эльтра» на частицы диаметром 1,09 и 20 мкм (II).

I — эллипсоидные частицы полистирола, II — макимоформальдегидной смолы, III — алюминия, IV — магния, V и VI — семена льна и хлопчатника

коэффициента преломления δm , размеров счетного объема δV , флуктуацией длины волны излучения $\delta \lambda$, концентрации молекул газа и более мелких частиц в счетном объеме δN_H , ошибками в

тракте анализа и регистрации сигналов δA и фотометрической ошибкой ФЭС δI , связанной, в свою очередь, с изменчивостью интенсивности излучения в счетном объеме δV , дрейфом коэффициента усиления в тракте фотоприемника δK , загрязнением приемной оптикой δO :

$$\delta I_1 = \sqrt{(\delta I_0)^2 + (\delta K)^2 + (\delta O_0)^2}$$

Принципиально неустранимым источником погрешности измерения аэрозольных частиц является зависимость показаний ФЭС от коэффициента преломления частиц. Так, уменьшение m от 1,5 до 1,33, что характерно для процессов обводнения атмосферного аэрозоля, обуславливает (в случае прибора АЗ-5) уменьшение сигнала от частицы примерно в два раза. Это, очевидно, вынуждает проводить калибровку ФЭС по частицам того же материала, что и у измеряемого аэрозоля. Ошибку δm можно уменьшить техническим путем, а именно путем использования малоугловых или широкоапертурных оптических схем ФЭС [11].

В частности, как видно из рис. 2, схемы ФЭС, собирающих рассеянный свет в углах $60-120^\circ$, обеспечивают сравнительно небольшой разброс рабочей характеристики при калибровке прибора эталонными частицами с различными комплексными показателями преломления.

Опыт показывает, что при надлежащем выборе элементной базы ФЭС инструментальная погрешность ФЭС, включающая погрешности δI_0 , $\delta \lambda$, δI , δA , δV , в диапазоне размеров $0,7-5$ мкм не превышает 10%. Сведения о диапазоне измерения размеров и погрешностях δD ряда спектрометров аэрозолей без учета вклада ошибок δm и δN приведены в таблице.

3. Диапазон измерения концентрации частиц ограничен сверху заданной величиной относительной погрешности измерения концентрации δN_1 , вызванной попаданием в счетный объем более чем одной частицы одновременно, или просчетами в анализаторе, а снизу — необходимо обеспечить представителенность объема выборки частиц M при фиксированном времени получения этой выборки t . Для ФЭС, имеющих счетный объем в форме параллелепипеда, эти ограничения на величину N можно выразить в виде неравенства

$$\frac{\delta N_1}{V} \geq N \geq \frac{M}{Vt}, \quad (12)$$

где t — длительность импульса от частицы.

Из (12) видно, что для снижения нижнего предела измерения концентрации частиц при фиксированных t , M и V целесообразно уменьшать t . Здесь, однако, появляется новое ограничение, связанное с уменьшением отношения сигнал/шум при увеличении полосы частот сигналов в соответствии с формулой (2).

Даже эти простые рассуждения говорят о том, что к вопросам реализации тех или иных характеристик ФЭС следует относиться с известной осторожностью. С учетом простоты технического ре-

полнения и сравнительно небольших погрешностей из-за краевых эффектов, aberrаций и виньетирования световых пучков оптимальным можно считать выбор счетного объема в виде параллелепипеда со следующими размерами: $0,1 \times 0,1 \times 0,01$ см³. Тогда по (12) при характерных значениях ($M=1000$, $t=100$ с, $\delta N_1=0,1$, $\gamma=10^{-4}-10^{-5}$ с) ожидаемый диапазон измерения концентрации частиц составит $10^{-2}-10^2$ см⁻³ и порог чувствительности порядка 0,2 мкм, что, видимо, следует считать оптимальным для ФЭС, предназначенным для изучения атмосферных аэрозолей и для контроля чистоты воздуха производственных помещений.

4. Основная погрешность измерения счетной концентрации δN_1 частиц, как следует из основной расчетной формулы

$$N_1 = M_1 Q t,$$

определяется относительными погрешностями счета импульсов по каналам анализатора δM или погрешностью интенсиметра, дрейфом времени экспозиции δt , погрешностью установки объемного расхода воздуха δQ через счетную площадку, погрешностью, обусловленной попаданием более чем одной частицы в счетный объем δN_1 , а также занижением концентрации частиц вследствие краевого эффекта δA_1 , эффекта виньетирования δA_2 и неоднородности освещенности объема δA_3 :

$$\delta N_1 = \sqrt{(\delta M)^2 + (\delta t)^2 + (\delta Q)^2 + (\delta N_1)^2 + (\delta A_1)^2 + (\delta A_2)^2 + (\delta A_3)^2}$$

Преобладающая часть упомянутых частных погрешностей зависит от размера частицы, что усложняет процедуру учета погрешностей при большом числе градаций сортировки (числе каналов анализ) частиц по размерам.

Наибольший вклад в суммарную погрешность δN_1 и наибольшие трудности при оценке ее дает ошибка δA_3 , обусловленная неоднородностью освещенности счетного объема. В приборах, где используется механическое формирование счетного объема, вклад этой ошибки может быть сведен к минимуму довольно несложными и известными приемами [11]. Значительно хуже обстоит дело с высокочувствительными ФЭС, где величина счетного объема обычно делается как можно меньшей и соответственно неоднородность проявляется сильнее. Некоторые технические предложения по устранению этой погрешности описаны в [7]. Сведения об усредненных значениях погрешности δN_1 отдельных приборов даны в таблице.

5. Разрешающая способность характеризует возможность ФЭС надежно идентифицировать и регистрировать близкие по размерам частицы D_i и D_{i-1} . По общепринятому в спектроскопии определению [8] количественно она равна

$$R_i = \frac{D_i^*}{\Delta D_i}, \quad (13)$$

где D_1^* — размер, соответствующий провалу в результирующей кривой распределения частиц по размерам, полученной при пропускании через спектрометр двух близких по размеру и концентрации монодисперсных фракций частиц из одинакового материала; ΔD_1 — расстояние (в единицах размера частиц) между максимумами распределения, соответствующее началу наблюдаемости упомянутого провала (так называемый спектральный предел разрешения).

Строго говоря, значение R будет зависеть от того, каким критерием мы руководствуемся, фиксируя наличие провала. Так, по известному критерию Релея, провал идентифицируется при достижении уровня провала порядка 80% максимума кривых распределения. В практике спектрометрических работ применяют иногда другой критерий [8], указывающий на то, что предел разрешения спектрометра достигается, если интервал ΔD_1 численно равен ширине b_1 контура линии, взятой на ее полувысоте. Формула (13) тогда будет иметь вид

$$R_1 = \frac{D_1}{b_1}. \quad (14)$$

В случае спектрометров аэрозолей второй критерий представляется более предпочтительным, так как при подаче на вход ФЭС как можно более узких по размерам монодисперсных частиц позволяет получать аппаратную функцию спектрометра, учитывающую уширяющие действия практически всех факторов.

Полная аппаратная функция может быть представлена набором частных аппаратных функций, т. е. кривых, характеризующих реакцию спектрометра на монодисперсные частицы в интервале размеров D_1, \dots, D_2 при различной их концентрации, либо графиком функции $R_i = f(D_i)$. Для примера на рис. 2 даны частные аппаратные функции спектрометра «Эльта», полученные по монодисперсным частицам латекса 1,09 мкм и лилоподия 20 мкм при загрузке прибора, вдвое меньшей, чем номинальная. Для этого прибора реальная разрешающая способность в интервале размеров 0,4—2 мкм меняется в пределах 2—3, в интервале 2—30 мкм $R = 1,5—2$.

Разрешающая способность ФЭС определяется двумя группами факторов: физических и технических. Вклад основного физического фактора — неоднозначность характеристик «сигнал — размер частицы» — может быть уменьшен в значительной мере выбором углов наблюдения (сбора) рассеянного частицей света и вида совмещенной спектральной оптической характеристики ФЭС. Некоторые пути решения задачи рассмотрены в [11]. К числу основных технических уширяющих факторов следует отнести:

- неоднородность освещенности рабочего объема;
- вильетирование пучков рассеянного излучения;
- ограниченное число каналов анализа сигналов;
- недостаточная монодисперсность калибровочных частиц.

Каждое уширяющее влияние можно характеризовать своей спектральной шириной. Тогда результирующая ширина наблюдаемого инструментального контура линии для каждого i -го размера частиц будет определяться отношением

$$b_i = \sqrt{b_{1i}^2 + b_{2i}^2 + b_3^2 + b_4^2 + b_5^2 + b_{6i}^2},$$

где b_{1i} учитывает разброс размеров эталонных частиц, b_{2i} — неоднозначность рабочей характеристики ФЭС, b_3 — размывание амплитуды сигнала вследствие виньетирования световых пучков, b_4 — неоднородность освещенности счетного объема, b_5 — краевые эффекты, b_{6i} — конечность числа и ширину каналов анализа.

При оценке качества спектрометров принято различать теоретический ΔD_T и реально достигаемый ΔD_D пределы разрешения. Теоретический предел ограничен разбросом размеров эталонных частиц и реальной шириной спектрометрических каналов анализа. Сведения о реальной R_D (для прибора «Эльга») и теоретической R_T (для остальных приборов) разрешающей способности приведены в таблице. На практике может иметь место различие реальных и теоретических значений разрешающей способности.

Важно отметить, что разрешающая способность спектрометров аэрозолью определяет, помимо разрешаемого подынтервала размеров, также достоверность передачи значений интенсивностей спектральных линий, т. е. концентраций частиц данного размерного интервала, а в итоге достоверность измеренной функции распределения частиц по размерам. Четко определять вклад этой характеристики в искажения функции распределения частиц по размерам можно лишь, зная вид аппаратной функции спектрометра, т. е. в общем случае основные технические данные спектрометра должны включать сведения о его рабочей характеристике и аппаратной функции в рабочем интервале размеров и концентрации частиц.

Значение разрешающей способности по (14) может находиться в пределах от 0,5 до бесконечности. Можно предложить следующую качественную классификацию ФЭС по величине R . Если $R=0,5-1$, то прибор имеет низкую разрешающую способность и понятие «спектрометр» к нему неприменимо. По существу, это либо видякатор, либо счетчик аэрозольных частиц в отдельных широких размерных интервалах. При $R=1-5$ имеем спектрометр среднего разрешения. Такие значения R имеют большинство промышленных ФЭС (таблица). Значения $R=5-10$ имеют спектрометры высокого разрешения. Приборы с $R>10$ следует относить к классу спектрометров сверхвысокого разрешения.

По требуемой величине разрешающей способности спектрометра можно устанавливать целесообразные значения параметра $p=D_i/D_{i-1}$ и количества каналов z анализа. Соответствующие формулы выводятся из достаточно простых соображений и имеют

вкд

$$p \Rightarrow \frac{2R+1}{2R-1}, \quad (15)$$

$$z = \ln \frac{(D_z/D_1)}{\ln p}, \quad (16)$$

где D_1, D_n — нижний и верхний пределы измерения размеров частиц.

Так, по данным, приведенным в таблице для электрического анализатора модели 3030, можно оценить целесообразные значения p и z , которые составляют, по (15) и (16), соответственно 1,78 и 9. Именно эти значения реализованы в приборе.

Несколько слов по поводу укоренившихся в литературе (например, [11, 15]) понятий «разрешающая сила» и «степень монодисперсности», определяемых в виде отношения

$$R^* = \Delta D_i^*/D_i, \quad (17)$$

где ΔD_i^* — полуширина функции распределения на полувысоте.

Подобная интерпретация может вносить смысловую путаницу. Так, из (17) следует, что для увеличения разрешающей способности ФЭС или степени монодисперсности эталонного аэрозоля следует уменьшать значение $\Delta D^*/D$. Здесь очевидно противоречие. По-видимому, нецелесообразно также определять ΔD через полуширину функции распределения, поскольку в практике работы с аэрозолями мы часто имеем дело с несимметричными функциями распределения. Учитывая сказанное, выражение (17), где ΔD — ширина функции распределения монодисперсного аэрозоля или аппаратной функции спектрометра на размерном подынтервале, имеет смысл стандартного отклонения i -го размера аэрозоля либо относительной ширины аппаратной функции для i -го интервала размеров.

Информационные характеристики

В последние годы наметился подход к анализу информативных характеристик спектральных приборов, в частности таких, как скорость измерения, анализа и выдачи статистически обеспеченной информации о спектре; степень использования информации о частицах из всего потока их, прошедшего через прибор; степень отклонения измеренного спектра от истинного, и т. д.

В [5, 8] рассматривались возможности сопоставления информативной способности спектральных приборов по параметру качества. Он находится из соотношения $K = C/C_0$, где C_0 — количество информации, поступившей на вход спектрометра за время измерения, C — количество информации, фактически используемой за то же время. Применительно к спектрометрам аэрозолей параметр

качества целесообразно называть параметром полноты анализа выборки (ПАВ) и представлять в виде

$$K = \frac{Q}{Q_0} \sqrt{\frac{\Delta t}{t}} \quad (18)$$

где Q_0 — общий объемный расход аэрозоля (точнее, среды с аэрозолем) через прибор; Q — расхода аэрозоля через рабочий объем прибора; Δt — время измерения, необходимое для получения репрезентативных данных о частицах одной фракции размеров; t — то же во всем диапазоне размеров или по всем градациям.

Для ФЭС, где осуществляется последовательный принцип измерения концентрации частиц каждой заданной фракции, например в фотоэлектрических счетчиках типа АЗ-5 (СССР), РС-218 и РС-221 (фирма Ройко, США), электрических анализаторах модели 3030 (фирма Термо-Системс, США), отношение $t/\Delta t$ численно равно числу градаций размеров. В приборах, где используется параллельный принцип анализа, множитель $(\Delta t/t)^{1/2} = 1$. Операция извлечения корня квадратного в (18) введена в соответствии с винеровской оценкой информативной значимости количества уронеи квантования спектра [5].

Сведения о значениях параметра качества, рассчитанных с использованием соотношения (18), приведены в таблице.

Из таблицы следует, что значения K , близкие к 1, имеет единственный прибор — «Аэлига-М», поскольку в нем, во-первых, анализируется практически весь поступающий в прибор поток аэрозоля, во-вторых, применен параллельный принцип анализа амплитуд сигналов. Низкие значения K для прибора «Гамма» связаны с тем, что в приборе выполнено оптическое формирование счетного объема, повлекшее за собой, с одной стороны, высокие значения коэффициента аспирации частиц, с другой стороны, использование только малой части поступающего в прибор аэрозоля.

Таким образом, наряду с основными метрологическими характеристиками (диапазон и погрешности измерения размеров и концентрации аэрозоля, разрешающая способность) сведения о спектрометрах аэрозолей целесообразно дополнять паспортными значениями счетного объема V , объемного расхода аэрозоля через счетную площадку Q и параметра полноты анализа выборки K .

В заключение выражаю признательность Н. К. Никифоровой за полезные замечания, сделанные при подготовке рукописи статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белзев С. П., Гончаров Н. В., Дубровин М. А. Исследование характеристик и модернизация счетчика аэрозольных частиц АЗ-5. — Труды ИЭМ, 1980, выд. 25(93), с. 31—37.
2. Гончаров Н. В. Лазерный счетчик аэрозолей (см. настоящий сборник).
3. ГОСТ 14826-69. Прибор для измерения физико-химических величин. Радиолокаторы. Термины. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 5 с.

4. ГОСТ 15824-75. Масс-спектрометры. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 8 с.
5. Инфракрасная спектроскопия высокого разрешения. — М.: Мир, 1972. — 351 с.
6. Кайро В. С., Смирнов В. В. Лазерный анализатор дисперсности аэрозолей. — Порошковая металлургия, 1980, № 10, с. 93—96.
7. Коломней С. М., Смирнов В. В. Некоторые возможности совершенствования фотоэлектрических счетчиков аэрозолей (см. настоящий сборник).
8. Нагибина Н. М., Михайловский Ю. К. Фотографические и фотоэлектрические спектральные приборы в техника эмиссионной спектроскопии. — Л.: Машиностроение, 1981. — 247 с.
9. Никифорова Н. К. Фотоэлектрические приборы для измерения концентрации и функции распределения аэрозоля по размерам. — Труды ИЭМ, 1973, вып. 4(38), с. 53—59.
10. Никифорова Н. К., Седунов Ю. С. Точность фотоэлектрического прибора в зависимости от освещенности рабочего объема при наличии паразитной засветки. — Труды ИЭМ, 1972, вып. 1(33), с. 98—103.
11. Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / С. П. Белая, Н. К. Никифорова, В. В. Смирнов, Г. И. Щелчков. — М.: Энергоатомиздат, 1981. — 232 с.
12. Панов В. Н., Яскевич Г. Ф. Телевизионный спектрометр аэрозолей «Аспект-10» (см. настоящий сборник).
13. Фабелинский Н. А. Молекулярное рассеяние света. — М.: Наука, 1965. — 511 с.
14. Фотоэлектрический счетчик аэрозольных частиц типа АЗ-5. Техническое описание В/о «Машрабинторг», М., 1972. — 33 с.
15. Fine particles, Aerosol generation, measurement, sampling and analysis. — Ed. V. Y. Liu, Acad. Press, New York, 1976. — 837 p.
16. Lewis C. W., Lamothe P. J. A microcomputer — modified particle size spectrometer. — Aerosol Science, 1978, vol. 9, N 5, p. 391—397.

ТРУДЫ ИНСТИТУТА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МЕТЕОРОЛОГИИ
Вып. 19(73)

1978 г.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДВУХВОЛНОВОГО ЛАЗЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НИЖНЕЙ КРОМКИ ОБЛАКОВ

В. А. КОРШУНОВ, Н. П. РОМАНОВ

Введение

Одним из возможных способов получения информации о микроструктуре облачной среды является восстановление функции распределения или ее параметров по данным многоволнового лазерного зондирования. Для выбора диапазона длин волн зондирования необходимы сведения о характерных размерах частиц в облаках. Как известно [1], внутри облаков модалный радиус сформировавшегося спектра капель в большинстве случаев лежит в пределах 2—10 мкм. Однако при лазерном зондировании с помощью наземных установок из-за большой величины коэффициента ослабления в видимой и ближней инфракрасной области спектра может последоваться только слой вблизи границы облаков. По данным измерений фотоэлектрическим счетчиком, на нижней границе слоистых облаков модалный радиус спектра лежит в пределах 1—2,5 мкм [2]. Сравнительный анализ параллельных измерений прозрачности и водности облаков в [3] показал, что вблизи нижней границы облаков имеется большое количество частиц радиусом, меньшим 2 мкм, заметно влияющих на оптические характеристики среды.

Целью данной работы было исследование влияния мелких капель на оптические характеристики облака на его нижней границе с помощью лазерного зондирования на двух длинах волн.

Постановка задачи

Связь между оптическими характеристиками среды и углом обратного рассеяния дается так называемым лидарным уравнением. В приближении однократного рассеяния и малой пл-

тельности зондирующего импульса это уравнение имеет следующий вид:

$$P(R) = \frac{AE}{R^2} \bar{x}_s(R) T^2(R), \quad (1)$$

где A — аппаратная постоянная, E — энергия зондирующего импульса, R — расстояние до рассеивающего объема, \bar{x}_s — лидарное отношение, α — коэффициент ослабления, $T^2(R) = \exp\left(-2 \int_0^R \alpha(r) dr\right)$ — прозрачность на трассе зондирования между точками 0, R . Величина \bar{x}_s зависит от вида функции распределения частиц по размерам, но не зависит от концентрации частиц, поэтому она удобна для оценки параметров микроструктуры.

После ряда преобразований из (1) получается выражение

$$\bar{x}_s = \frac{2 \int_{R_1}^{R_2} F(r) dr}{T^2(R_1) - T^2(R_2)}, \quad (2)$$

где

$$F(r) = \frac{P(r)r^2}{AE}, \quad \bar{x}_r = \left(\int_{R_1}^{R_2} F(r) dr \right) / \left(\int_{R_1}^{R_2} \frac{F(r)}{x_s(r)} dr \right).$$

\bar{x}_s можно рассматривать как некоторое эффективное значение x_s на отрезке $[R_1, R_2]$ (если $x_s = \text{const}$, то $\bar{x}_s = x_s$).

В случае зондирования низкой облачности с нижней границей в точке R_1 и при отсутствии у поверхности земли плотной дымки можно положить $T^2(R_1) = 1$. С другой стороны, в облаке сигнал быстро затухает, и для некоторой точки R_2 внутри облака $T^2(R_2) = 0$. Тогда

$$\bar{x}_s = 2 \int_0^{R_2} F(r) dr.$$

В [4] рассчитывались лидарное отношение для водного аэрозоля в случае Γ -распределения по размерам и было получено, что величина лидарного отношения стабилизируется на уровне 0,05.

и не зависит от параметров спектра при $\mu_{12} > 25$, где $\mu_{12} = \rho_0 \left(1 + \right.$

$\left. + \frac{3}{\mu} \right)$ — средний параметр дифракции, $\rho_0 = \frac{2\pi r_0}{\lambda}$, r_0 — модальный радиус, λ — длина волны, μ — параметр полуширины Γ -распределения. Согласно последним экспериментальным данным [5, 6] средняя величина относительной дисперсии облачных распределений равна 0,2—0,4. Для Γ -распределения относительная дис-

переня равна 0,4 при $\mu=5$. Отсюда следует, что для $\lambda=1,06$ и 0,53 мкм лидарное отношение будет отклоняться от 0,05 при заданном радиусе капель, меньшем 2,6 и 1,3 мкм. Очевидно, что для распределений более сложной формы, но описываемых достаточно гладкими функциями, отклонение лидарного отношения от 0,05 может также рассматриваться в качестве критерия существования значительной по вкладу в оптические характеристики фракции частиц размерами 1—2 мкм.

Сравнение формы сигналов на двух длинах волн также позволяет судить о размерах облачных частиц. Если основной вклад в обратное рассеяние вносят крупные частицы, то, согласно [4], лидарное отношение будет равно постоянной величине $\approx 0,05$ и коэффициенты ослабления будут одинаковы на обеих длинах волн. Тогда, как следует из (1), отношение сигналов на двух длинах волн будет постоянным и, наоборот, в случае существования значительной мелкокапельной фракции формы сигналов на двух длинах волн будут различаться или из-за разницы в коэффициентах ослабления, или вследствие изменения лидарного отношения в условиях изменяющейся вдоль трассы микроструктуры.

Описание макета лидарной установки

Для проведения измерений был собран макет лидарной установки, работающей на двух длинах волн. В качестве излучателя использовался серийный ОКГ на неодимовом стекле ГОС-30 м. Для получения моноимпульса длительностью 30—50 нс в резонаторе ОКГ поставлен просветляющийся фильтр. С помощью нелинейного элемента КДР часть излучения неодимового ОКГ преобразовывалась во 2-ю гармонику. Энергия в импульсе составляла ≈ 1 и 0,1 Дж на длинах волн 1,06 и 0,53 мкм.

Излучение, направляющееся в атмосферу, телескопировалось. В результате угловая расходимость излучения не превышала $5'$ на обеих длинах волн. В каждом отдельном импульсе производилось измерение энергии в относительных единицах с помощью фотометров типа ФОГ. В приемной системе использовались два объектива с $F=1600$ мм и диаметром приемной апертуры 145 мм. В качестве приемников излучения применялись ФЭУ железного типа. Большие выходные токи этих ФЭУ позволяла использовать согласованную нагрузку 75 Ом, при этом сигналы подавались непосредственно на вход осциллографов типа СГ-31. Осциллограмма фотографировалась.

Калибровка установки проводилась с помощью рассеивающего экрана из фторопласта, установленного на расстоянии ~ 400 м от лидара. Коэффициент яркости экрана в направлении назад был измерен путем сравнения с эталонным рассеивателем. Калибровка делалась периодически в условиях прозрачной атмосферы, а перед каждой отдельной серией измерений производилась установка чувствительности приемных трактов, начиная с ФЭУ, с помощью стабилизированной импульсной лампы типа ИШО-1.

Питание всех приборов, входящих в схему регистрации, осуществляется через автотрансформаторы. Напряжение питания во время измерений поддерживалось постоянным.

Отдельные составляющие погрешности измерений оцениваются следующим образом: нестабильность лампы ИПО-1 — 2%, ошибка относительных осциллографических измерений — 5%, ошибка калибровки пропускания ослабляющих светофильтров и коэффициента яркости экрана — 2 и 5%, ошибка измерения временных интервалов — 5%. Суммарная среднеквадратическая величина погрешности составляет 9%. Эти оценки косвенным образом подтверждаются совпадением результатов калибровки по рассеивающему экрану в разные дни в пределах 5%. (На эти результаты не влияют погрешности измерения временных интервалов и коэффициента яркости экрана.)

Результаты измерений и их обсуждение

Зондирование проводилось под углом 45° к горизонту. Исследовались слоистообразные облака с высотой нижней границы менее 300 м в октябре — ноябре 1976 г. Было проведено несколько серий измерений. Сравнение синхронных сигналов на двух длинах волны

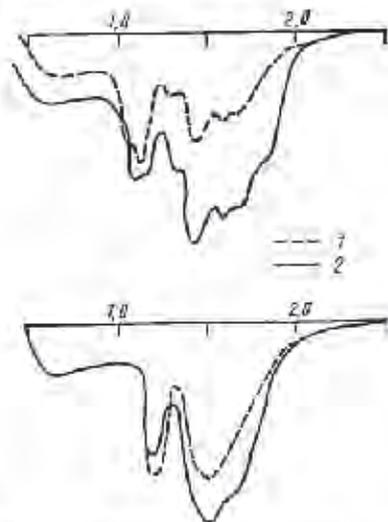


Рис. 1. Сигналы обратного рассеяния в относительных единицах:

1 — $\lambda = 0,53$ мкм, 2 — $\lambda = 1,06$ мкм

на рис. 2а и б различаются незначительно, на рис. 2в

показывает, что, как правило, их форма существенно различна. Характерные параметры полученных сигналов приводятся на рис. 1 и 2. На рис. 1 показан случай (29 XI 1976), когда ниже основной границы облаков есть еще один рассеивающий слой. Сигнал от нижнего слоя на длине волны 0,53 мкм больше, а на длине волны 1,06 мкм меньше, чем от основной границы облаков. На рис. 2 представлены определенные из лидарного уравнения значения $\sigma_r T^2(R)$ ($\sigma_r \sim \sim P(R)R^2$, σ_r — коэффициент обратного рассеяния) для трех последовательных зондирований, разделенных промежутками времени 3 мин. Кривые 1 и 2 на рис. 2а и 2б отличаются величиной $\sigma_r T^2$ на длине волны 0,53 мкм значительно больше, чем на длине волны 1,06 мкм на

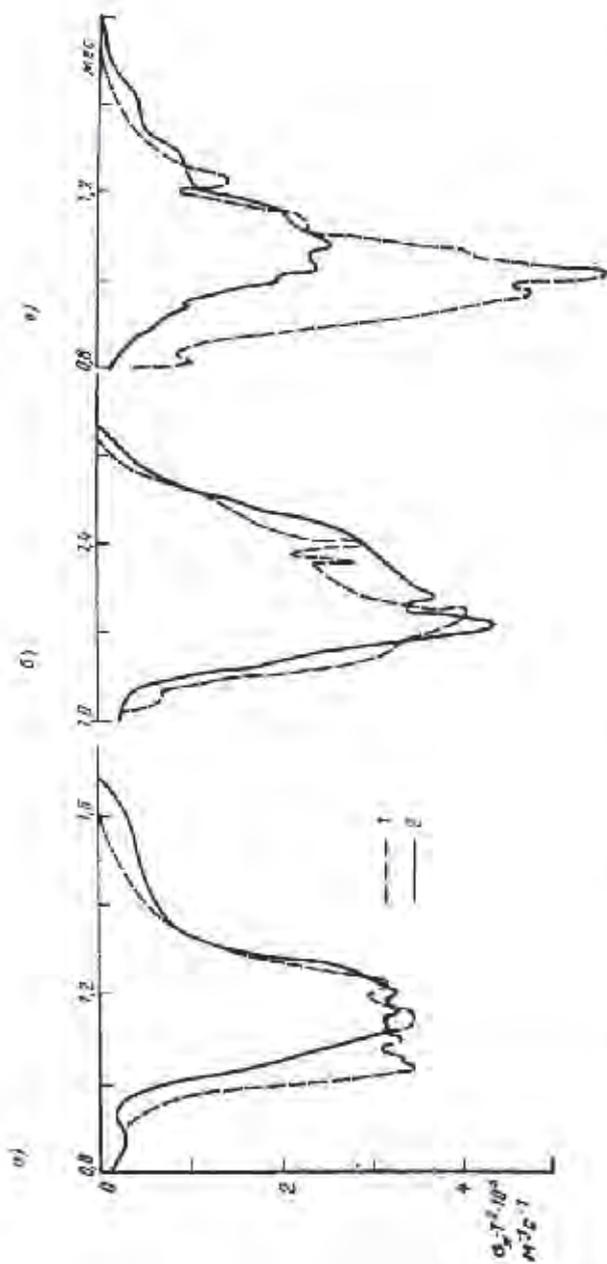


Рис. 2. Зависимость коэффициента обратного рассеяния на квадрат преломляемости для двух предельных значений угла наблюдения от n^2 .

Угол наблюдения θ , рис. 1

нижней границе облака. В то же время величины $\overline{\kappa_x}$ для случаев зондирования, показанных на рис. 2а и 2б, различны: $\kappa_x = 0,029$ на обеих длинах волны (рис. 2а), $\kappa_x = 0,038$ на $\lambda = 1,06$ мкм и $\kappa_x = -0,036$ на $\lambda = 0,53$ мкм (рис. 2б). Приведенные примеры указывают, во-первых, на присутствие значительной мелкокапельной фракции на нижней границе облаков, а во-вторых, на изменчивость микроструктуры как вдоль трассы зондирования, так и во времени. В табл. 1 представлены величины $\overline{\kappa_x}$, полученные последовательно по одной из серий измерений.

Таблица 1
Усредненные по трассе зондирования
ландарные отношения

λ	Номер измерения				
	1	2	3	4	5
1,06	0,027	0,029	0,038	0,023	0,025
0,53	0,033	0,029	0,036	0,050	0,026

Из табл. 1 видно, что значение $\overline{\kappa_x}$, как правило, не равно 0,05—предельному значению для крупных частиц. Аналогичные результаты получены в других сериях измерений.

Для ряда случаев зондирования, представленных в табл. 1, был подобран возможный вид спектра, объясняющий экспериментальные результаты. Сначала были рассмотрены наиболее простые одномодальные двухпараметрические модели: Г-распределение и логарифмически нормальное распределение. Изменение параметра полуширины производилось в пределах, соответствующих наблюдаемым в реальных облаках ($\mu = 1 \div 25$ для Г-распределения [1], соответствующие полуширины были взяты и для логарифмически нормального распределения). Проведенные расчеты показали, что ни при каких значениях модального радиуса эти типы распределений не могут объяснить полученные экспериментальные данные. Этот результат не является неожиданным. Согласно существующим представлениям о формировании спектра на нижней границе облаков в процессе конденсационного роста частиц происходит разделение спектра на две части: мелкие обводненные ядра и крупные капли. Очевидно, что модельная функция распределения частиц по размерам должна отражать эту особенность спектра на нижней границе облаков. Поэтому модельный спектр был взят в виде суммы двух логарифмически нормальных распределений

$$f(r) = \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_1)^2}{M_1} \right] + K \exp \left[-\frac{(\ln r - \ln r_2)^2}{M_2} \right].$$

Число варьируемых параметров в этом случае равно пяти: r_1 , r_2 , M_1 , M_2 и K . Функция невязки была выбрана в следующем виде:

$$F(r_1, r_2, M_1, M_2, K) = \sqrt{\sum_{i=1}^2 \left(\frac{\ln \bar{x}_{\text{теор}} - \ln \bar{x}_{\text{эксп}}}{\Delta_i} \right)^2},$$

где $\bar{x}_{\text{теор}}$ — расчетные значения \bar{x}_k для длины волны λ_i , Δ_i — относительная погрешность экспериментальных данных.

Минимизация F в пространстве параметров осуществлялась методом конфигураций [7]. Значения оптимальных параметров даны в табл. 2. Приведенные в табл. 2 значения параметров определяют функции распределения, не противоречащие данным, полученным другими методами [2, 3].

Таблица 2

Параметры функции распределения

\bar{x}_k (0,53)	\bar{x}_k (1,05)	r_i , мкм	M_1	r_2 , мкм	M_2	K
0,029	0,029	0,15	1,3	1,5	0,8	$2,5 \cdot 10^{-2}$
0,036	0,036	0,25	2,05	2,5	1,05	$3,0 \cdot 10^{-2}$
0,026	0,026	0,16	1,55	3,30	1,05	$6,7 \cdot 10^{-3}$

Следует отметить, что значения параметров могут меняться в некоторых пределах, так что при этом будет сохраняться соответствие расчетных и экспериментальных величин \bar{x}_k в пределах ошибок измерений. Поэтому приведенные в табл. 2 значения следует рассматривать как один из возможных вариантов решения задачи.

ВЫВОДЫ

Сравнение формы сигналов обратного рассеяния на двух длинах волн и полученные значения лидарного отношения показывают, что в нижней части облаков содержится большое количество мелких частиц, существенно влияющих на оптические характеристики. Это дает основание сделать вывод о возможности получения информации о функции распределения частиц по размерам, по крайней мере в мелкокапельной области спектра, с помощью зондирования на длинах волн до 1 мкм.

Наблюдается большая изменчивость микроструктурных характеристик в нижней части слоистообразных облаков как во времени, так и вдоль трассы зондирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зуев В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере. М., «Сов. радио», 1970. 496 с.
- Юдин К. Б. Некоторые результаты измерений локальных характеристик облаков слоистой формы. — «Метеорология и гидрология», 1976, № 12, с. 44—47.
- Оптическая плотность облаков. Гл. 5. — Труды ЦАО, 1976, вып. 124, с. 100—108. Авт.: А. Л. Косарев, Е. П. Мазня, А. Н. Невзоров, В. Ф. Шугаев.
- Пришивалко А. И., Науменко Е. К. Показатели обратного рассеяния и ослабления света водяным аэрозолем. — Изв. АН СССР. ФАО, 1973, 9, № 6, с. 660—663.
- Wagner Y. The microstructure of cumulus cloud. Part I. General features of the droplet spectrum. — J. Atm. Sci., 1969, 26, N 5, p. 1049—1059.
- Невзоров А. Н., Шугаев В. Ф. О характеристиках и измерении локальной микроструктуры облаков. — Труды ЦАО, 1974, вып. 106, с. 17—23.
- Батяшев Д. И. Показательные методы оптимального проектирования. М., «Сов. радио», 1975. 216 с.

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КЛИНОВЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ОБЛАСТИ СПЕКТРА 1,1—2 мкм

М. И. АЛЛЕНОВ, А. С. ВАСИЛЬЕВ, Р. А. ДАВЛЕТШИНА

Клиновые фильтры циркулярной формы, впервые разработанные А. Теленом в 1965 г., находят все большее применение в спектрометрической аппаратуре. Это обусловлено тем, что линейное изменение положения полосы пропускания таких фильтров по кодышу позволяет путем вращения их позади щели получить монохроматор, пропускающий длины волн в заданном спектральном интервале.

В настоящее время известны конструкция и способы изготовления клиновых фильтров для спектральных диапазонов: 0,4—0,75;

0,7—1,2; 1,8—3,2 и 3,0—5,2 мкм, т. е. для области спектра от 0,4 до 5,2 мкм, за исключением интервала 1,2—1,8 мкм [1, 2]. Отсутствие клиновых фильтров для диапазона 1,2—1,8 мкм объясняется имеющимися трудностями в выборе материалов и конструкции интерференционного покрытия. Таким образом, стояла задача выбора наиболее оптимальной пары веществ и разработки конструкции интерференционного покрытия для клинового фильтра циркулярной формы в спектральном интервале 1,1—2,0 мкм. Металлодиэлектрическая конструкция интерференционной системы клиновых фильтров для диапазона 0,4—1,2 мкм не может быть использована в области спектра выше 1,2 мкм, так как оптические параметры такой системы в ней сильно ухудшаются. Из многослойных диэлектрических систем лучшими спектральными характеристиками обладают так называемые оптимизированные системы, состоящие из слоев разной толщины, но их практическая реализация сильно затруднена из-за невозможности использования оптического контроля толщины напыляемых слоев (по экстремальным значениям пропускания). А контроль толщины слоев с помощью кварцевого резонатора требует строгой стабилизации таких технологических параметров, как скорость испарения вещества, давление и состав остаточных газов в вакуумной камере, температура подложек и др.

Кроме того, в спектральном диапазоне 1,1—2,0 мкм весьма ограничено количество пригодных веществ для напыления и нет пары веществ с большой разницей показателей преломления, как, например, между германием и диоксидом кремния, которые используются при изготовлении интерференционных систем для клиновых фильтров в диапазоне 1,8—5,2 мкм. Поэтому исследовалась возможность использования прозрачных в этой области вещества, пригодных для реактивного испарения; основные характеристики которых приведены в таблице.

Вещество	Материал испарителя	Температура испарения, °С	Показатель преломления n
Na_3AlF_6 (криолит)	Ta, MO	1000	1,35
SrF_2	Mn, W	1100	1,43
YF_3	Mo, W	1135	1,55
ZnS	W, Mo	1100	2,3
ZnSe	Ta	950	2,57
Sb_2S_3	Mo	370	2,7

Эксперименты показали, что интерференционные системы на основе ZnS — криолит, ZnSe — криолит, Sb_2S_3 — криолит самопроизвольно разрушались. Покрытия отслаивались или в процессе изготовления, или спустя некоторое время после окончания напыления и напуска воздуха в вакуумную камеру. Это, по-видимому, обусловлено напряжениями в толстых пленках криолита:

Интерференционные системы на основе слоев $ZnS—YF_3$ имеют наибольшую прочность, но оптические характеристики их не удовлетворяют требованиям, необходимым при создании клинового фильтра. Из-за сравнительно небольшой разности между показателями преломления не удается достичь необходимой ширины зоны подавления.

Из возможных комбинаций веществ с низким и высоким показателями преломления наиболее пригодной оказалась пара $Sb_2S_3—SrF_2$. Оптические характеристики интерференционных систем из этих веществ как основной, так и отрезающих, оказались приемлемыми для клиновых фильтров в спектральном диапазоне от 1,1 до 2,0 мкм.

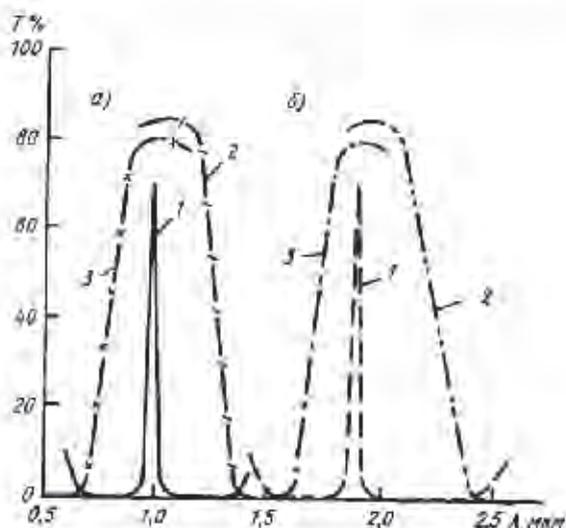


Рис. 1. Спектральные характеристики интерференционных систем для угловых положений 15° (а) и 165° (б):
1 — узкополосная основная, 2 — коротковолновая отрезающая, 3 — длинноволновая отрезающая

Полосы пропускания клинового фильтра сформированы с помощью 11-слойной узкополосной интерференционной системы. Для подавления побочных полос основной системы использовались 12-слойная длинноволновая и 17-слойная коротковолновая отрезающие системы на основе Sb_2S_3 и SrF_2 . Спектральные характеристики пропускания (Т) этих систем для двух угловых положений клинового фильтра (15° и 165°) приведены на рис. 1.

Каждая интерференционная система наносится на отдельную подложку. Это вызвано тем, что при наложении нескольких си-

стем на одной подложке возникают нежелательные «провалы» в области пропускания. Таким образом, конструкцию интерференционного клинового фильтра можно представить следующим образом:

$$P_1, \text{ВНВНВ}2\text{НВНВНВ} + P_2, \text{ВНВНВНВНВНВ}0,5\text{Н} + \\ + P_3, 0,5\text{ВНВНВНВНВНВНВНВНВ}10,5\text{В}$$

где P_1 — подложка из ИКС-6; P_2 — подложка из К-8; В — четвертьволновые слои из Sb_2S_3 ; Н — четвертьволновые слои из SnF_2 .

Подложки представляют собой плоскопараллельные пластины толщиной 3,5 мм в виде полукольца с внешним и внутренним диаметрами 100 и 30 мм соответственно.

Для термизации все три подложки складываются вместе через прокладку покрытыми внутри и склеиваются по торцу клеем К-300, затем помещаются в металлическую оправу.

Напыление проводилось на вакуумной установке типа УВН-71П-3 с внутрикамерным устройством, описанным в [1], но с измененной системой контроля. Вместо монохроматора УМ-2 использовался монохроматор ИКМ-1 с призмой из стекла Ф-1. В качестве фотоприемника применялось фотоспротивление типа ФР-1—4 на основе PbS. Контроль толщины напыляемых слоев велся по экстремумам пропускания, которые регистрировались автоматическим потенциометром КСП-4.

Нами разработаны несколько клиновых фильтров, которые имеют следующие оптические характеристики. Интервал длин волн = 1,1—2,0 мкм; пропускание по спектру 30—50%; относительная полуширина — 1—2%; фон вне полосы пропускания не более 0,5%. Эти параметры являются лучшими по сравнению с параметрами клиновых фильтров для других спектральных диапазонов. Спектральная характеристика клинового фильтра для трех угловых положений приведена на рис. 2.

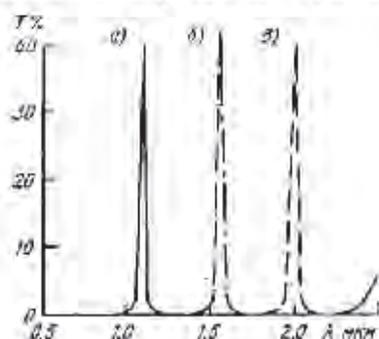


Рис. 2. Спектральная характеристика клинового фильтра для угловых положений 15° (а), 90° (б) и 165° (в).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев А. С., Давлетшина Р. А. Аппаратура для изготовления клиновых интерференционных фильтров. — Труды ИЭМ, 1961, вып. 10(84), с. 3—6.
2. Марциновский В. А., Понимарева Н. В. Кольцевой переменный фильтр для области спектра 0,1—1,2 мкм. — Журнал прикладной спектроскопии, 1980, т. 32, № 5, с. 946—949.

Е. Н. ДАВИДОВ, С. Г. МАЛАХОВ,
К. П. МАХОНЬКО, С. Т. МАШКОВ

ФИЛЬТРУЮЩИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОАКТИВНОЙ ПЫЛИ В ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЕ

Для определения концентрации продуктов деления в атмосфере воздух, содержащий радиоактивную пыль, профильтровывается через высокоэффективную фильтровку типа ФП (фильтр Петрянова). Асирация воздуха осуществляется с помощью центробежного вентилятора высокого давления, имеющего большую производительность. В настоящее время уровень радиоактивного загрязнения приземного воздуха невелик, поэтому через фильтр надо пропускать достаточно большое количество воздуха, чтобы можно было измерить радиоактивность уловленных продуктов деления.

В табл. 1 приводятся ориентировочные данные о концентрации некоторых изотопов в приземной атмосфере средних широт в пе-

Таблица 1

Минимальное количество воздуха $V_{\text{мин}}$, подлежащее фильтрации, для определения концентрации радиоактивных изотопов

Изотоп	$q \cdot 10^{-3} \frac{\text{расп.}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$	$A_{\text{мин}} \frac{\text{расп.}}{\text{мин.}}$	$V_{\text{мин}} \cdot 10^3 \text{ м}^3$
Sr ⁹⁰	20	4	0,2
Cs ¹³⁷	30	300	7
Ce ¹⁴⁴	100	1000	10
Pu ²³⁹	20	500	25
Mn ⁵⁴	200	100	0,5
Zr ⁹⁵	2	100	50
Fe ⁵⁵	200	20	0,1
Cd ¹⁰⁹	0,5	50	100
Sb ¹²⁵	20	300	15
Sr ⁸⁹	3	20	7
Bc ⁷	10	1000	100

риод прекращения испытаний термоядерного оружия (зима 1964/65 г., данные сети HASL). Там же дана величина минимальной радиоактивности изотопа в пробе A_{\min} , которая необходима для его надежного количественного определения. Цифры, выделенные полужирным шрифтом, означают, что они получены по методике радиохимического выделения изотопа из смеси осколков деления с последующим измерением радиоактивности на малофоновой установке. Остальные данные относятся к гамма-спектрометрическому определению изотопов. Минимальная измеряемая радиоактивность пробы зависит от величины и стабильности фона. В наших условиях надежное определение радиоактивности может проводиться при превышении активности изотопа над фоном, равным величине самого фона. Из этой предпосылки и получены приведенные в табл. 1 значения A_{\min} .

Зная величину минимальной определяемой радиоактивности и концентрацию изотопа в воздухе φ , нетрудно определить минимальное количество воздуха V_{\min} , которое необходимо пропустить сквозь фильтр. Эти данные приведены в последнем столбце таблицы. При определении необходимой производительности фильтрующей установки следует учесть возможные флуктуации средних суточных значений концентрации изотопов в воздухе, отличающиеся в несколько раз от приведенных в таблице средних значений. Поэтому производительность фильтрующей установки и продолжительность ее работы должны выбираться так, чтобы объем профильтрованного воздуха в несколько раз превышал значение V_{\min} .

В случае измерений радиоактивности воздуха в экспедиционных условиях необходимо сочетать высокую скорость аспирации с возможно меньшими габаритами установки и меньшими расходами электроэнергии на ее работу.

Исходя из этих требований, нами были использованы три типа фильтрующих установок для отбора проб радиоактивной пыли. Самая мощная установка — стационарного типа. Она предназначена для отбора из воздуха больших количеств радиоактивного аэрозоля, позволяющих проводить полный изотопный анализ. В этой установке используется центробежный вентилятор типа ВВД-9 с производительностью 8000 м³/час при перепаде давления 600 мм H₂O. Площадь фильтра 1 м². Привод — клиноременный от асинхронного мотора мощностью 20 квт. Мотор и вентилятор установлены на бетонированном фундаменте. Вес всей установки 300 кг. Для получения пробы при малых уровнях радиоактивного загрязнения воздуха фильтрующая установка может включаться на круглые сутки.

Фильтрующая установка второго типа — это экспедиционный вариант, предназначенный для использования на морских судах. Судовой электровентилятор типа 19ЦС-48 имеет производительность около 2000 м³ при площади фильтра 0,3 м². Мощность мотора 4,5 квт. Так как в экспедиционных условиях на море увели-

чивается вероятность различного рода неисправностей и воздействия случайных факторов, то, как правило, одновременно работают две такие фильтрующие установки. Таким образом, все измерения концентрации дублируются, а при малых концентрациях изотопов пробы объединяются в одну.

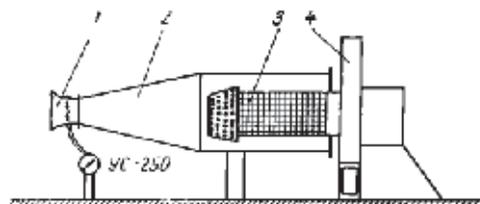


Рис. 1. Схема фильтрующей установки с измерительной насадкой для определения скорости фильтрации воздуха.

В процессе определения концентраций радиоактивных аэрозолей в атмосферном воздухе весьма важно правильно измерить скорость воздушного потока через фильтр. Часто для этой цели используют анемометры Фусса и трубки Пито. Использование

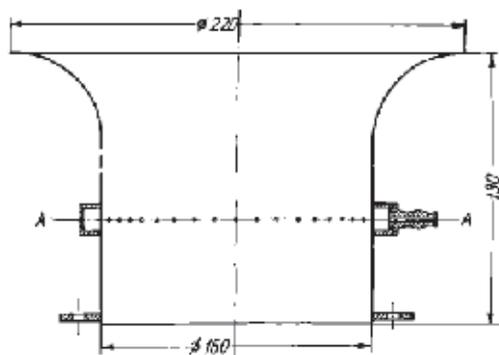


Рис. 2. Схема сопла измерительной насадки.

первых приводит к существенным ошибкам, а использование вторых неудобно, так как требуется снимать поле скоростей на входе установки. Нами для измерения объема отфильтрованного воздуха была сконструирована специальная измерительная насадка.

На рис. 1 насадка 2 изображена в рабочем состоянии укрепленной на корпусе воздуходувки 4. При этом цилиндрический сетчатый фильтродержатель 3 заключен внутрь измерительной насадки, так что весь воздух предварительно проходит через измерительное сопло 1, создавая там перепад давления, который

измеряется самолетным указателем скорости УС-250. Детали устройства сопла и его габариты указаны на рис. 2. Потеря производительности из-за дополнительного сопротивления, создаваемого измерительной насадкой, не превышает 6%. Точность измерения расхода воздуха измерительной насадкой определяется тщательностью ее изготовления и обычно обусловлена точностью прибора УС-250 (3—5%).

Расчет ламинарной скорости потока воздуха через сопла производится по формуле

$$w = \sqrt{\frac{(p_0 - p) 2g}{\rho}}$$

где p_0 — давление окружающего воздуха, p — статическое давление в сечении А—А, ρ — плотность воздуха, g — ускорение силы тяжести.

Фильтрующая установка третьего типа снабжена устройством, автоматически сменяющим фильтры по заранее заданной программе. Установка используется для систематических измерений суточного хода концентрации продукта деления в воздухе, для определения изменений этой концентрации во время дождя и после прекращения осадков, для наблюдений за прохождением облаков радиоактивных аэрозолей и при решении ряда других задач, связанных с измерением радиоактивности в сравнительно короткие, последующие друг за другом периоды времени. В установке используется электроклапан ЭВ-54/23-1, производительность ее 250 м³/час.

В настоящее время известны описания установок, в которых отбор проб радиоактивной пыли производится на движущуюся фильтровальную ленту. Так как ширина ленты ограничена, то рабочая поверхность фильтра в таких установках невелика, вследствие чего эти установки можно использовать только для измерения высоких уровней активности в пролабированных условиях или для измерения короткоживущих продуктов распада радона. Для увеличения площади фильтра и одновременного соблюдения компактности нами применена кассета, состоящая из набора П-образных рамок, через переключатели которых наматывается лента из фильтровальной бумаги. Для предохранения от слипания двух смежных слоев фильтра между ними внутри каждой рамки вкладывается гофрированный сепаратор. Набор из 12 кассет расположен по краю диска, который, поворачиваясь через заданные интервалы времени, отбрасывает экспонированную кассету от трубы воздухоудлики и присоединяет к отверстию воздухоудлики следующую кассету. Общая площадь фильтра в одной кассете составляет 0,1 м².

На рис. 3 изображены схемы автоматического переключения фильтров и управляющего программного устройства.

На входной трубе 17 воздухоудлики с помощью ролик 1 и хомутов 18 укреплен панел 2 с установленным на ней электродвигателем 5 типа МУ-50 с редуктором 6, имеющим на фланце выход-

ного вала редуктора палец 8. На той же плате 2 с помощью флянца 7 установлена вертикальная ось 8 с надетым на нее полым валом 10 с двенадцатизубой шестерней 9 на одном конце и диском 11 на другом. На диске 11 по окружности расположены двенадцать кассет 13 с открытыми горловинами 12, выходящими на нижнюю сторону диска 11. Каждая кассета 13 сверху имеет съем-

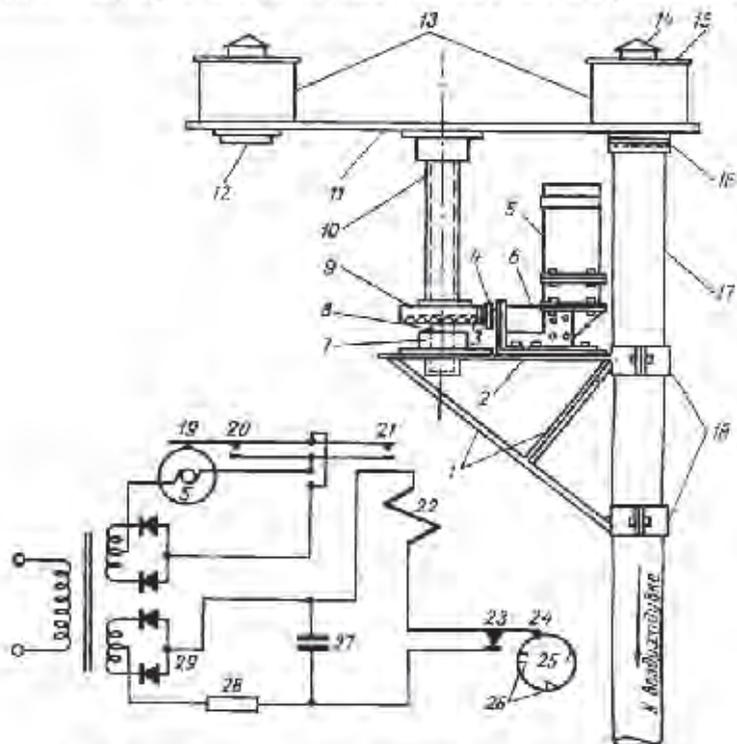


Рис. 3. Схема устройств для автоматической смены фильтров.

ную крышку 15 с входным отверстием для воздуха, защищенным от дождя и снега колпачком 14.

Двенадцатизубая шестерня 9 укреплена на валу 10 в таком положении последнего, что, когда палец 8 вала редуктора 6 входит в одну из впадин шестерни и фиксирует ее в таком положении, горловина 12 одной из кассет 13 входит в гнездо 16 на входной трубе 17 воздухоудавки. Поток воздуха, прасасываемый воздухоудавкой, входит в отверстие крышки 15 кассеты, проходит через фильтр, освобождаясь от радиоактивной пыли и, проходя через приемную трубу воздухоотвода, выбрасывается наружу. Фильтр

с уловленной пылью может быть изъят из кассеты 13 через крышку 15 для исследования.

Для установки времени выдержки фильтров служит реле времени на базе синхронного двигателя СД, состоящее из насаженного на ось выходного вала редуктора электродвигателя СД двойного диска 25 с пазами 26, служащими для замыкания контакта 23 и цепи пускового реле 22 явля РП при западании в пазы 26 кулачка 24. Питание реле осуществляется с помощью выпрямителя 29 через цепочку накопителя 28 и 27.

Двойной диск 25 состоит из диска, насаженного на валик редуктора, и второго — подвижного диска, выступы которого при передвижении диска вокруг оси и последующего фиксирования могут блокировать часть пазов неподвижного диска и тем самым изменять промежутки времени между замыканиями контакта 23 цепи пускового реле 22.

Действие автоматического переключателя состоит в том, что после промежутка времени, установленного на двойном диске 26, кулачок 24 опускается в очередной паз 26, замыкая контакту 23 цепи пускового реле 22, которое срабатывает, замыкая цепь электродвигателя 5 через контакт 21. Электродвигатель 5 через редуктор 6 с помощью пальца 3 поднимает двенадцатизубую шестерню 9 вместе с диском 11 и расположенными на нем кассетами 13, одновременно поворачивая их вокруг оси 8 на $\frac{1}{12}$ окружности. Горловина 12 «рабочей» кассеты при этом выходит из гнезда 16 и, передвигаясь вперед, уступает место горловине соседней кассеты, которая при дальнейшем движении пальца 3 опускается в гнездо 16, становясь «рабочей» кассетой.

Кулачок 19 на флянце 4 редуктора электродвигателя 5 при первом же сдвиге флянца 4 отпускает пружинки дублирующего контакта 20, замыкая тем самым цепь электродвигателя 5, который после этого может вращаться при отпуске пускового реле 22 до полного оборота флянца 4, когда кулачок 19, нажимая на пружинку контакта 20, разомкнет его и выключит электродвигатель 5.

При очередном срабатывании реле 22 происходит запуск электродвигателя 5 и цикл смены кассеты повторяется. После экранирования всех 12 кассет в лаборатории производится перезагрузка кассет новым комплектом фильтров.

Разработанные типы фильтрующих установок, описанные выше, позволяют решать ряд задач, связанных с определением концентрации радиоактивной пыли в приземной атмосфере в различных условиях. Опыт их длительной эксплуатации показал правильность выбранных параметров установок и надежность конструкции.

В. С. Королев, С. А. Петриченко,
В. Д. Пудов, Ю. Н. Чернецкий

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОЛЕННОСТИ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА

В течение многих лет не ослабевает интерес океанологов к изучению изменчивости физических полей в океане. Известно, что пространственное распределение температуры и солености в поверхностном слое имеет пятнистый характер. Работы в этой области были направлены как на выяснение физической природы „пятнистости“ (см. например, обзор [4]), так и на выявление характерных масштабов неоднородностей в различных географических регионах [6]. В основном эти работы были связаны с исследованием полей температуры, поскольку непрерывные измерения солености *in situ* вследствие чисто технических трудностей проводить значительно сложнее. В большинстве случаев измерения проводились буксируемыми вблизи поверхности термомодульниками или зондами типа „Нырок“ на одном горизонте [2]. Известны единичные случаи синхронных измерений температуры, а иногда и солености на нескольких горизонтах [1, 3, 5].

В экспедиции „Тайфун-90“ на НИСП „Прибой“ были проведены синхронные измерения температуры и солености на 12 горизонтах (от 0 до 125 м) при выполнении двух гидрологических разрезов, а также измерения тех же параметров на 10 горизонтах в одной точке при дрейфе судна. Измерения проводились при помощи специального измерительного комплекса „Компас-М“ в рамках его полевых испытаний.

Краткое описание измерительного комплекса

„Компас-М“ — комплекс для измерения, регистрации и первичной обработки данных по температуре, удельной проводимости и гидростатическому давлению воды в слое 0—400 м на ходу судна. Комплекс, созданный в ЦКБ ГМП по заказу НИПО „Тайфун“, предназначен для эксплуатации на научно-исследовательских судах.

Функционально комплекс разделен на две части: измерительная и бортовая устройство. Измерительная часть — буксируемая гидролиния („термотрал“), которая представляет собой кабель-трос (длина — 1800 м) с углубителем на конце. К кабель-тросу

крепятся в произвольных местах контейнеры (до 24 шт.) для измерения на каждом горизонте трех выше названных параметров. Связь контейнеров с бортовым устройством осуществляется по кабель-тросу бесконтактным способом (используется индуктивная связь). Одновременно могут работать до 12 контейнеров, остальные являются резервными. При отказе одного из рабочих контейнеров включается в работу автоматический. Опрос контейнеров производится бортовым устройством. Врмк между опросом двух соседних контейнеров составляет — 1 с, частота опроса задается с борта судна и определяется исследовательскими целями. Минимальный период измерений — 30 с. Углубитель обеспечивает заглубление гидролинии до 300 м при скорости судна 6 уз и до 200 м при скорости 12 уз (при длине троса 1800 м). Бортовое устройство предназначено для обеспечения командной и информационной связи с подводными измерительными контейнерами, предварительной обработки принимаемой информации, ее графического представления и регистрации на долговременном техническом носителе.

В состав бортового устройства входит микро-ЭВМ типа ДВК-2(3), двухкоординатный самописец и накопитель на магнитной ленте, который дублирует накопитель ДВК на гибком диске. Диапазоны и точность измеряемых параметров: температура от -2 до $+32$ °С, погрешность $\pm 0,08$; удельная электрическая проводимость от 2 до 7 см/м, погрешность $\pm 0,01$; гидростатическое давление от 202 до 3034 кПа, погрешность ± 40 . В течение экспедиции, кроме чисто технических испытаний комплекса, проведения его сверок со стандартной аппаратурой (гидрозондом) были выполнены две исследовательские буксировки: 17—18 сентября 1990 г. по 124° в. д. от 20 до 22° с. ш. и 19 сентября 1990 г. по 126° в. д. от 21 до 19° с. ш. с целью выявления масштабов термохалинных неоднородностей на различных уровнях в дельтальном слое океана и проверки возможностей комплекса.

Ниже приводятся результаты обработки данных, полученных в ходе этих буксировок.

В дальнейшем первая буксировка будет именоваться разрез 1, а вторая — разрез 2. Во время буксировки каждый рабочий контейнер был зафиксирован в определенном месте на кабель-тросе, но его глубина колебалась в процессе работы. Для получения массивов данных по температуре и солености на фиксированных горизонтах по каждому разрезу в каждой точке измерений (опрос датчиков осуществлялся раз в минуту, время одного опроса всех датчиков, т. е. фактически время получения одного профиля температуры и солености, — 12 с) проводилась линейная интерполяция на заданный горизонт значений температуры и солености. Сформированные таким образом по каждому горизонту ряды прошли статистическую и спектральную обработку.

В табл. 1 представлены характерные пространственные масштабы температурных l_T и калийных l_S неоднородностей на четырех глубинах z на разрезах 1 и 2.

Таблица 1

z м	l_T км	l_S км
Разрез 1		
0	100, 40, 15—20	60, 30
30	100, 20—25	85, 30
76	80, 40, 25, 15	80, 30, 20, 10
126	60, 30	50, 20—25, 10
Разрез 2		
0	85, 35, 15—20	85, 40, 20, 10
30	100, 35, 20—25	100, 40, 25, 10—15
76	80, 40, 10—30	85, 40, 20—25, 10—15
126	100, 35, 10—30	85, 40—50, 10—20

Неоднородности указанных масштабов внесли наибольший вклад в изменчивость полей температуры и солёности на разрезах. Здесь необходимо отметить, за наш взгляд, следующий факт: если на разрезе 2 практически на всех горизонтах соответствующие характерные масштабы температурных и калийных неоднородностей близки, то на разрезе 1 они не совпадают полностью. Это говорит о том, что, по-видимому, аномалии полей температуры и солёности на разрезе вдоль 126° в. д. порождены одним механизмом. Действительно, разрез 2 проходил в следе ТЦ «Дот», который пересек этот меридиан 6 сентября 1990 г. на 20,5° с. ш. и в следе ТЦ «Эд» (14 сентября 1990 г. пересек 126° в. д. на 19,5° с. ш.). Эти ТЦ являлись единичными источниками возмущений для всех полей гидрофизических характеристик. В невозмущенных же условиях (разрез 1) механизмы формирования аномалий полей температуры и солёности — различны. Частичное совпадение характерных масштабов температурных и калийных неоднородностей вдоль разреза 2, а также закономерностей их распределения обусловлено, вероятно, фоновыми характеристиками до воздействия ТЦ. Считается [4], что пространственное распределение гидрофизических характеристик описывается в основном двумя модельными представлениями: геострофической турбулентностью, спектр которой аппроксимируется зависимостью K^{-3} , и системой резких горизонтальных градиентов (закон K^{-2}). Промежуточные аппроксимации спектров указывают на совместное действие указанных механизмов.

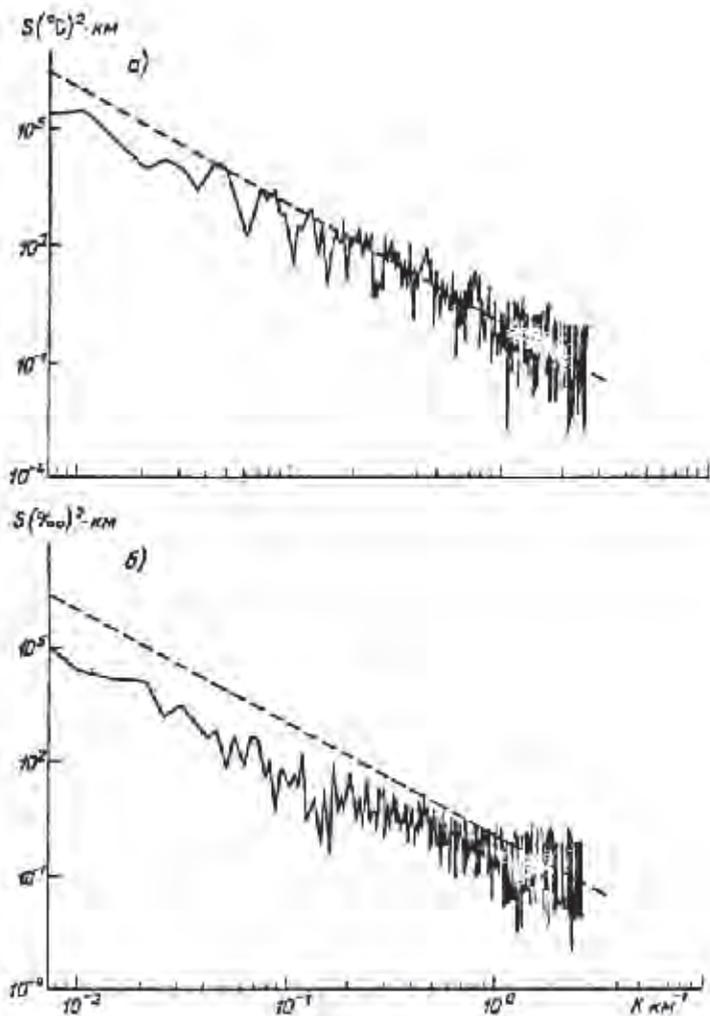


Рис. 1. Спектры изменчивости горизонтальных распределений ТПО (а) и поверхностной солености (б) вдоль профиля 1. Штриховая линия — аппроксимация K^{-4} .

На рис. 1 и 2 показаны спектры изменчивости горизонтальных распределений поверхностной температуры и солености вдоль разрезов 1 и 2. Штриховыми линиями на каждом спектре показана аппроксимация K^{-2} . Из рисунков видно, что во всех представленных случаях спадание спектров происходит медленнее и не описывается только моделью геострофической турбулентности, хотя спектры и можно аппроксимировать степенной зависимостью K^n . В табл. 2 представлены значения n для спектров температуры вдоль двух разрезов (S_{T_1} и S_{T_2}) и соответствующих спектров солености (S_{S_1} и S_{S_2}) на различных глубинах z ; n рассчитывались для каждого спектра методом наименьших квадратов.

Таблица 2

г м	n			
	S_{T_1}	S_{T_2}	S_{S_1}	S_{S_2}
0	-2,63	-2,19	-1,95	-1,97
10	-2,36	-2,48	-1,93	-2,07
30	-2,54	-2,66	-1,86	-2,25
40	-2,78	-2,32	-1,83	-2,46
60	-2,80	-2,65	-1,83	-2,40
80	-2,66	-2,70	-2,19	-2,37
76	-2,67	-2,75	-2,00	-2,43
100	-2,65	-2,70	-2,06	-1,93
126	-2,74	-2,18	-2,50	-1,63

Из таблицы видно, что: 1) законы распределения температуры и солености на разрезе 2 более близки, чем на разрезе 1, что объясняется, на наш взгляд, указанным выше воздействием ТЦ; 2) показатели степени зависимостей, аппроксимирующих спектры температуры во всех случаях находятся в пределах $-3 \dots -2$, что совпадает с данными о пространственных распределениях температуры, приведенными в более ранних работах; 3) спектры солености до глубины 50 м спадают медленнее, чем K^{-2} , что не описывается ни одной из существующих моделей (разрез 1). По-видимому, такое пространственное распределение солености характерно для невозмущенных, фоновых условий. По данным, полученным на разрезах, были также рассчитаны коэффициенты корреляции температуры и солености на различных глубинах. На рис. 3 представлены вертикальные профили коэффициентов корреляции поверхностной температуры R_{TT} и поверхностной соле-

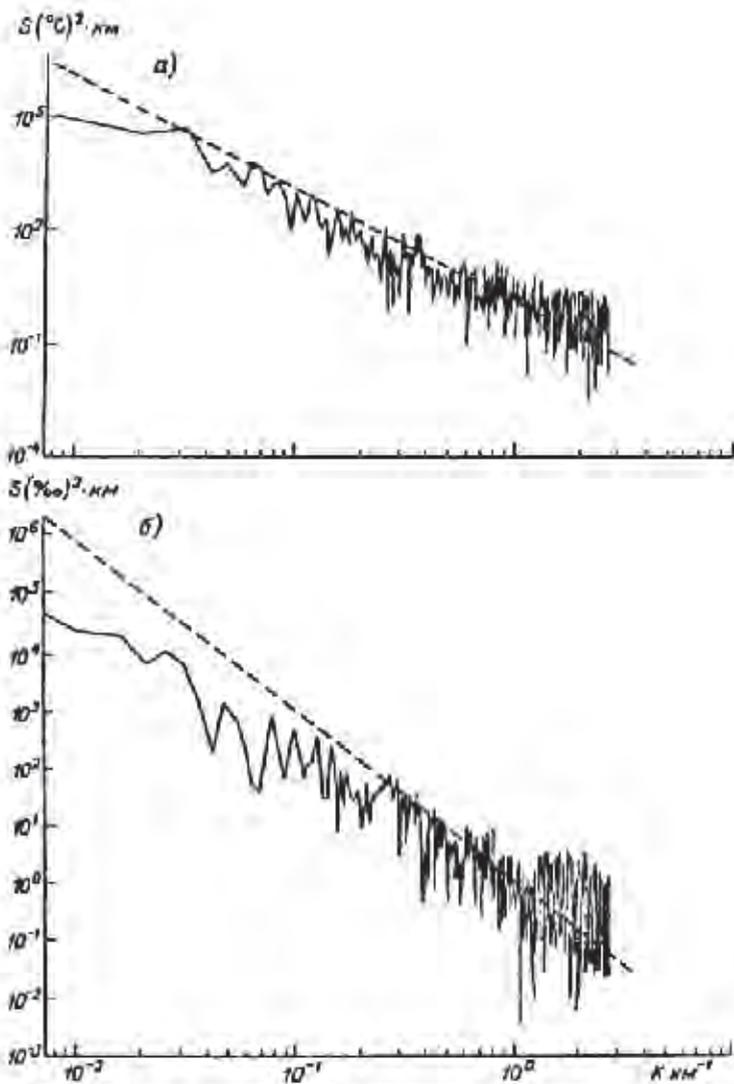


Рис. 2. Спектры неменчивости горизонтальных распределений ТПО (а) и поверхностной солености (б) вдоль разреза 2.

Штриховая линия — аппроксимация K^{-8} .

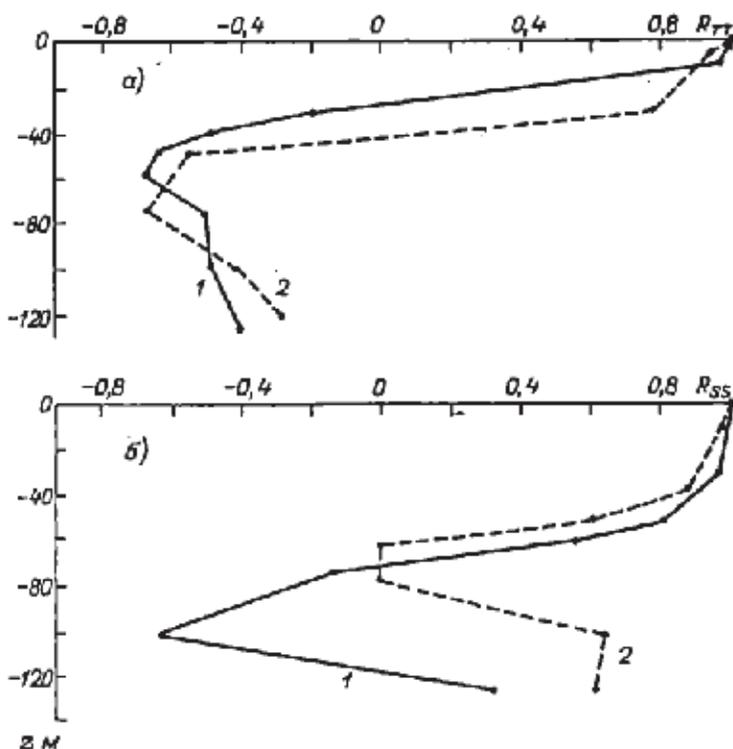


Рис. 3. Вертикальные профили коэффициентов корреляции поверхностной температуры (а) и солености (б) с температурой и соленостью на различных глубинах вдоль разрезов 1 и 2 (соответственно цифры у кривых).

ности R_{SS} с температурой и соленостью на различных глубинах. Качественно профили R_{TT} и R_{SS} на обоих разрезах подобны, однако между профилями R_{TT} есть существенное различие. Смена знака R_{TT} на разрезе 1 (невозмущенные условия) происходит на глубине, примерно равной середине толщины квазиоднородного слоя, а на разрезе 2 (след ТЦ) — на верхней границе слоя скачка (по среднему профилю температуры). Смена знака корреляции в профилях R_{SS} на обоих разрезах происходит вблизи слоя макси-

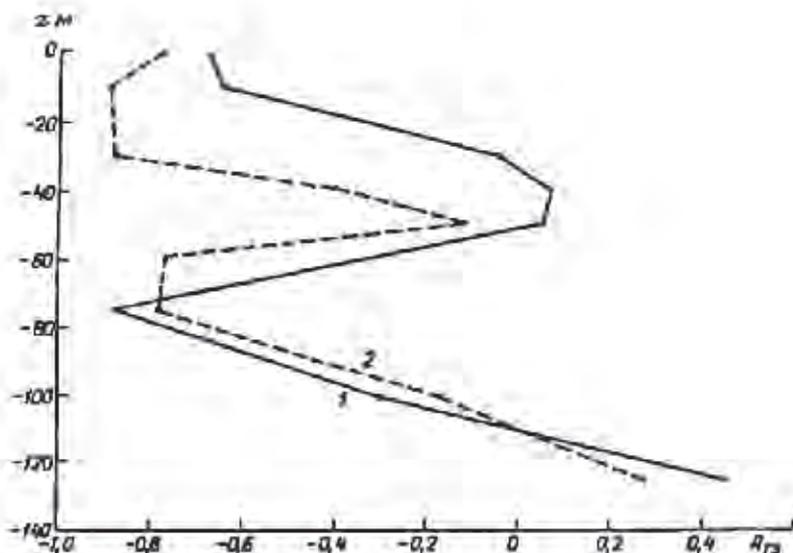


Рис. 4. Вертикальные профили коэффициентов корреляции между температурой и соленостью на различных глубинах вдоль разрезов 1 и 2 (соответствующие цифры у кривых).

мальных градиентов солености. Но если в невозмущенных условиях на разрезе 1 в слое подповерхностного максимума солености наблюдается максимальная отрицательная корреляция ($-0,7$) с соленостью на поверхности, то в следе тайфуна в этом слое она положительная. Особенностью вертикальных профилей корреляции между температурой и соленостью R_{TS} на различных глубинах (рис. 4) является наличие двух максимумов отрицательной корреляции: в приповерхностном слое (до глубины 20—30 м) и вблизи слоя максимума солености (нижняя граница слоя минимальных градиентов), где значения R_{TS} достигают $-0,8 \dots -0,9$. Отсутствие корреляции между температурой и соленостью ($R_{TS} = 0$) наблюдается на тех же глубинах, где происходит смена знака в профилях R_{TT} .

При работе в точке гидроливня опускалась за борт при свободном дрейфе судна. По условиям работы на полигове макси-

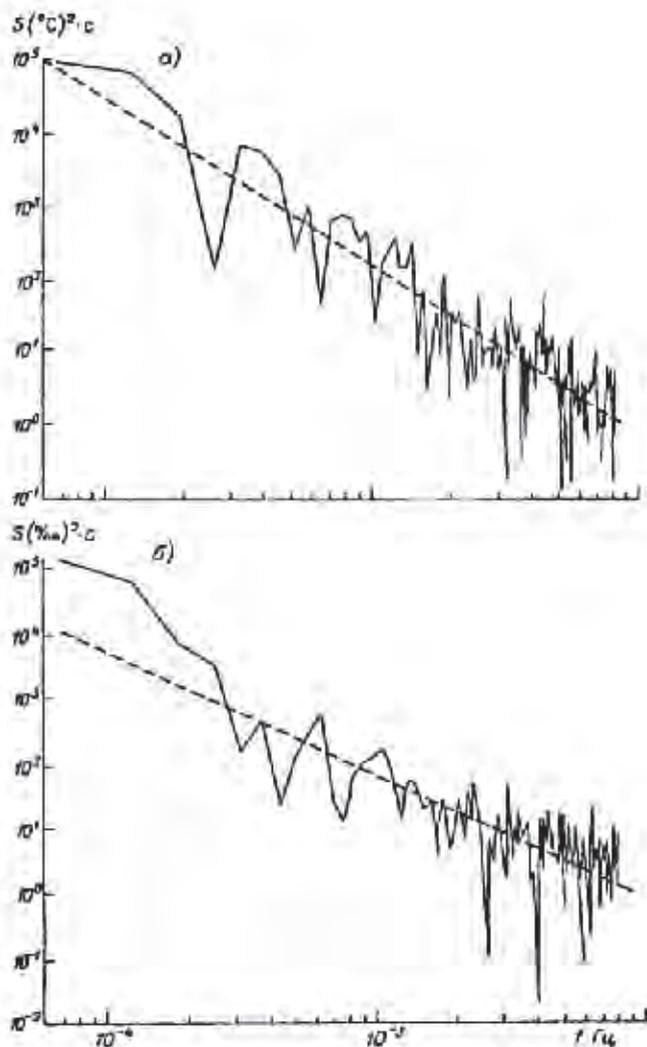


Рис. 5. Спектры изменчивости температуры (а) и влажности (б) в квазистационарном слое на стационарном полигоне.

Пунктирные линии — аппроксимирующие зависимости: для температуры $f^{1.5}$, для влажности $f^{1.8}$.

мальный срок судна от рабочей точки не должен был превышать 15 миль, поэтому не удалось получить достаточно длинные непрерывные ряды измерений при использовании термитрала в режиме „термососы“. Наибольшая продолжительность полученных реализаций составила 7 ч при дискретности измерений 1 мин. В этом случае в работе находилось в течение всего срока одновременно 9 контейнеров. По данным, полученным в течение этой серии измерений, были рассчитаны спектры изменчивости температуры и солености на фиксированных горизонтах. Основные периоды изменчивости характеристик: в квазиоднородном слое для температуры — 50 мин, для солености — 25 мин; ниже слоя скачка для температуры — 33 и 100 мин, для солености — 17, 33, 67 мин.

На рис. 5 представлены спектры температуры и солености в квазиоднородном слое (глубина — 30 м) и аппроксимирующие их степенные зависимости.

Как видно из приведенных данных, временные спектры солености с увеличением частоты спадают существенно медленнее спектров температуры. Тот же эффект наблюдался для пространственных спектров при увеличении волновых чисел. Удовлетворительного объяснения существенного расхождения характерных периодов изменчивости температуры и солености, а также различия в законах спадаения их спектров пока не найдено.

Приведенные выше предварительные результаты обработки данных измерений, проведенных при помощи измерительного комплекса „Компас-М“, убедительно показывают его полезность в исследовании физических процессов в деятельном слое океана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная система термисрефильтрации верхнего слоя океана / В. Т. Пека, И. Н. Корчажков, В. В. Нарожный, А. Б. Шмидт // *Океанология*. — 1984. — Т. XXIV, вып. 1. — С. 170—174.
2. Гидрологический буксируемо-зонавирующий комплекс МГИ-4204. Проект СКБ ТЭ МГН АН УССР. — Севастополь, 1988. — 20 с.
3. Корчажков И. Н., Нарожный В. В. Оперативная обработка данных о температуре верхнего слоя океана в экспедиционных условиях // *Океанология*. — 1984. — Т. XXIV, вып. 2. — С. 146—149.
4. Красновозаев А. Ю., Васюградская К. Г., Кузьмина Н. П. О пространственной изменчивости поля температуры в боверзностном слое океана (обзор) // Масштабная изменчивость поля температуры в океане. — М., 1977. — С. 6—22.

Б. Пудов В. Д., Беззаботнов В. С. Некоторые результаты исследования температурного поля поверхностного слоя океана после прохождения тайфуна // „Тайфун-76“. — Л., 1977. — Т. 1. — С. 59—66.

В. Пудов В. Д., Петриченко С. А. Температура поверхности Южно-Китайского моря и тропические циклоны // Метеорология и гидрология. — 1936. — № 12. — С. 118—121.

Содержание

Предисловие научных редакторов	3
Дрофа А.С., Иванов В.Н., Свиркунов П.Н. Исследования в области физики облаков и активных воздействий	5
Новицкий М.А. Пограничный слой атмосферы	25
Портнягин Ю.И., Юдаков А.А., Мерзляков Е.Г., Чкалов В.Г. Исследования верхней атмосферы и ионосферы	41
Нерушев А.Ф. Физика климата и климатообразующие факторы	59
Ингель Л.Х. Тропическая метеорология и опасные атмосферные явления	73
Крышев И.И. Радиационный мониторинг окружающей среды	85
Запевалов М.А., Сурнин В.А., Семенова И.В. Мониторинг химического загрязнения окружающей среды	111
Яскевич Г.Ф. Технические средства мониторинга природной среды и автоматизации научного эксперимента	139
Малышев В.А., Сарычев С.А. Автоматизация наблюдений за состоянием окружающей среды	161

Репринты основополагающих статей сотрудников НПО «Тайфун» из Трудов ИЭМ

Седунов Ю. С. Численный эксперимент по воздействию на кинетику формирования облачного спектра путем введения дополнительных ядер конденсации // Труды ИЭМ. 1969. Вып. 6. С. 3–9.	176
Александров Э.Л., Клепикова Н.В. Воздействие искусственными ядрами конденсации на развитие облачного спектра // Труды ИЭМ. 1975. Вып. 9(52). С. 3–15.	183
Беляев С.П., Ким Н.С. Разработка методики испытания генераторов льдообразующих аэрозольей и исследования некоторых условий воздействия на выход активных ядер // Проблемы метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1979. С. 29–40	196
Бызова Н.Л., Вяльцева Э.Е. Результаты апробации инженерной модели пограничного слоя атмосферы по измерениям ветра на высотной мачте // Труды ИЭМ. 1981. Вып. 27(100). С. 36–45.	208

Иванов В.Н., Ингель Л.Х.

Об одном механизме усиления когерентных структур в неоднородно запыленной атмосфере // Труды ИЭМ. 1992. Вып. 55(155).
С. 120–122 217

Мазурин Н.Ф.

Измерительно-вычислительный комплекс высотной метеорологической мачты ИЭМа // Труды ИЭМ. 1987. Вып. 10(131). С. 9–17..... 220

Гаргер Е. К., Найденов А. В., Уваров Д. Б.

Поперечная абсолютная дисперсия координат частиц примеси в приземном слое атмосферы // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 29(103). С. 82–88 229

Лысенко И.А., Орлянский А.Д., Портнягин Ю.И.

Исследование динамики атмосферы на высотах 80–100 км радиометеорным методом // Труды ИЭМ. 1982. Вып. 15(111). С. 35–50 236

Часовитин Ю.К.

Эмпирические модели электронной концентрации и электронной температуры // Труды ИЭМ. 1983. Вып. 13(102). С. 3–27..... 252

Арефьев В.Н., Боровский Н.В., Волковицкий О.А. и др.

Оптическая многоходовая кювета с базой 50 м для исследования спектров пропускания газов // Труды ИЭМ. 1974. Вып. 5 (43). С. 156–164. 277

Арефьев В.Н., Дианов-Клоков В.И., Малков И.П.

Полевой спектральный комплекс для исследований содержания в атмосфере загрязняющих газов // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 8(81). С. 73–78. 286

Хмелевцов С.С., Кауфман Ю.Г., Коршунов В.А.,

Светогоров Е.Д., Хмелевцов А.С.

Лазерное зондирование атмосферных параметров на Обнинской лидарной станции НПО «Тайфун»: сб. статей «Вопросы физики атмосферы». СПб.: Гидрометеоиздат, 1998. С. 358–392. (Фрагменты статьи: С. 358–370.) 292

Петросянц М.А.

Основные задачи и предварительные итоги экспедиции ТРОПЭК-72 (6 июня–19 сентября 1972 г.) // В сб. ТРОПЭК-72. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. С. 6–15. 305

Иванов В.Н.

Основные задачи и предварительные итоги Междуведомственной экспедиции «ТАЙФУН-75» (25 июня–5 ноября 1975 г.) // В сб. ТАЙФУН-75. Л.: Гидрометеоиздат, 1977. С. 5–13..... 315

Малахов К.П., Силантьев А.Н., Бобовникова Ц.И.,

Брендаков В.Ф., Махонько К.П., Полякова Т.В.,

Савченкова А.А., Чуркин В.Н.

Исследование динамики радиоактивных выпадений на территории СССР в 1963–1967 гг. Радиоактивность атмосферы // Труды ИЭМ. 1970. Вып. 17. С. 5–16. 324

Газиев Я.И.

Методика радиографирования зольных остатков проб атмосферных аэрозолей. Радиоактивность атмосферы // Труды ИЭМ. 1972. Вып. 1(32). С. 117–122. 336

Махонько К.П.

Методика построения карт плотности загрязнения почвы йодом-131 после аварии на Чернобыльской АЭС. Эколого-геофизические аспекты ядерных аварий: сборник статей ИЭМ. М.: Гидрометеиздат, 1992. С. 108–114. 342

Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв.

Часть I. Под редакцией канд. физ.-мат. наук С.Г. Малахова. М.: Московское отделение Гидрометеиздата, 1983. 128 с. Обложка, С. 4–7, 8–17, 82–85, 99–102, 106–115 349

Жбгловская Т.Н., Махонько Э.П., Шилина А.И., Егоров В.В., Малахов С.Г., Первунина Р.И.

Микроэлементы в природных водах и атмосфере // Труды ИЭМ. 1974. Вып. 2(41). С. 1, 114–118, 126–140. 381

Смирнов В.В.

Основные характеристики спектрометров аэрозолей // Труды ИЭМ. 1984. Вып. 7 (112). С. 3–17. 402

Коршунов В.А., Романов Н.П.

Некоторые результаты двухволнового лазерного зондирования нижней кромки облаков // Труды ИЭМ. 1978. Вып. 19(72). С. 107–113. 417

Алленов М.И., Васильев А.С., Давлетшина Р.А.

Диэлектрические клиновые фильтры для области спектра 1,1–1,2 мкм // Труды ИЭМ. 1985. Вып. 9(124). С. 68–71. 424

Давыдов Е.Н., Малахов С.Г., Махонько К.П., Машков С.Т.

Фильтрующие установки для определения концентраций радиоактивной пыли в приземной атмосфере // Труды ИЭМ. Вып. 2. Приборы и методы загрязнения внешней среды. Л.: Гидрометеиздат. 1970. С. 98–103 428

Королев В.С., Петриченко С.А., Пудов В.Д., Чернецкий Ю.Н.

Пространственно-временные неоднородности полей температуры и солёности в северо-западной части Тихого океана // Труды ИЭМ. 1996. Вып. 27(162). С. 69–79. 434

Оригинал-макет подготовлен в ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»
249035, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Королёва, 6

Компьютерная верстка: О.В. Игнатенко
Корректор: Н.А. Иванова

Подписано к печати 31.05.2018. Формат 60×90/16.
Печать офсетная. Печ. л. 26. Тираж 300 экз. Заказ №
Отпечатано в ООО «Информполиграф», г. Москва