

УДК 551.510.42

Комплексные исследования тропосферного аэрозоля в ИОА СО РАН (этапы развития)

М.В. Панченко, М.В. Кабанов, Ю.А. Пхалагов, Б.Д. Белан, В.С. Козлов,
С.М. Сакерин, Д.М. Кабанов, В.Н. Ужегов, Н.Н. Щелканов, В.В. Польшкин,
С.А. Терпугова, Г.Н. Толмачев, Е.П. Яушева, М.Ю. Аршинов,
Д.В. Симоненков, В.П. Шмаргунов, Д.Г. Чернов, Ю.С. Турчинович,
Вас.В. Польшкин, Т.Б. Журавлева, И.М. Насртдинов, П.Н. Зенкова*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 2.04.2019 г.

В работе, посвященной 50-летию Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, в определенной хронологии представлен обзор экспериментальных исследований, определивших важные этапы развития комплексного изучения жизни аэрозоля в атмосфере. Кратко обсуждаются основные результаты серий экспедиционных исследований оптических и микрофизических свойств аэрозоля морских прибрежных дымок, аридной зоны и различных географических районов Мирового океана. Описан современный набор методов и аппаратуры, применяемых нами для измерения аэрозольных характеристик в режиме мониторинга на сети станций ИОА СО РАН. Представлены результаты многолетних исследований тропосферного аэрозоля с применением самолета-лаборатории.

Ключевые слова: аэрозоль, оптические, микрофизические характеристики, коэффициенты рассеяния, ослабления и поглощения, спектральная прозрачность, аэрозольная оптическая толщина; aerosol, optical, microphysical characteristics, scattering, extinction and absorption coefficients, spectral transparency, aerosol optical depth.

Введение

Уже на этапе создания Института оптики атмосферы В.Е. Зуев в качестве базового принципа заложил комплексный подход к решению проблем атмосферной оптики, заключающийся в оптимальном сочетании всестороннего экспериментального изучения, развития теоретических основ и многофакторного моделирования [1]. Весьма трудно подобрать объект исследования, подобный атмосферному аэрозолю, ведущий параметр которого (размер)

изменяется на несколько порядков (от десятков ангстрем до сотен микрон), физико-химические свойства формируются под воздействием большого количества процессов из различных источников, а для моделирования и прогноза его оптического состояния в конкретных условиях необходимо считаться с пространственными координатами, изменяющимися по вертикали от сантиметров до километров, а по горизонтали — от метров до тысяч километров. Из сказанного выше становится понятно, что только комплексный подход позволяет обеспечить требуемое развитие приборной базы и получение новых научно обоснованных результатов.

Отметим, что во второй половине XX в. благодаря широкомасштабным исследованиям в ИФА, ИОА, ИЭМ, ЦАО, ИПГ, ЛГУ, ГГО, ГОИ, ГИПО, ИФ АН Белоруссии, АФИ НАН Казахстана и многим другим организациям отечественные ученые внесли огромный вклад в мировую аэрозольную науку. Даже в полноценном обзоре невозможно перечислить все экспериментальные и теоретические работы, выполненные в этот период (см., например, [1–18]).

Но и сегодня эксперты МГЭИК (IPCC) отмечают низкий уровень знаний о вкладе аэрозоля в радиационный баланс планеты [19], подчеркивая острую необходимость проведения детальных инструментальных исследований во всех природных зонах Земли на различных пространственных масштабах (глобальный — региональный — локальный).

* Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Михаил Всеволодович Кабанов (kabanov@imces.ru); Юрий Александрович Пхалагов (pkhalagov@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Валерий Степанович Козлов (vkozlov@iao.ru); Сергей Михайлович Сакерин (sms@iao.ru); Дмитрий Михайлович Кабанов (dkab@iao.ru); Виктор Николаевич Ужегов (uzhegov@iao.ru); Николай Николаевич Щелканов (snp@iao.ru); Виктор Викторович Польшкин (victor@iao.ru); Светлана Александровна Терпугова (swet@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru); Елена Петровна Яушева (helen@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Владимир Петрович Шмаргунов (vpsh@iao.ru); Дмитрий Григорьевич Чернов (chernov@iao.ru); Юрий Сергеевич Турчинович (tus@iao.ru); Василий Викторович Польшкин (sibvas@gmail.com); Татьяна Борисовна Журавлева (ztb@iao.ru); Ильмир Мансурович Насртдинов (wizard@iao.ru); Полина Николаевна Зенкова (zpn@iao.ru).

Ориентируясь на специфику номера журнала, посвященного 50-летию Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева ИОА СО РАН, в работе в определенной хронологии представлен обзор исследований, определивших, на наш взгляд, наиболее важные этапы развития комплексного изучения «жизни аэрозоля» в атмосфере.

Комплексные исследования аэрозоля в разных географических районах в 1970–1995 гг.

Прибрежные дымки. Выбор предмета исследований был продиктован следующими соображениями: к началу наших измерений оптические характеристики приземного аэрозоля в континентальных условиях были уже достаточно глубоко изучены коллективом под руководством Г.В. Розенберга (см., например, [5]), а морские и прибрежные районы в этом отношении были исследованы гораздо слабее.

Первый цикл работ, задействовавший практически весь созданный в ИОА комплекс приборов, был проведен в прибрежной зоне Черного моря с 1973 по 1981 г.

Впервые в практике исследований оптических свойств прибрежной дымки были проведены измерения спектральных коэффициентов общего ослабления излучения в диапазоне длин волн 0,45–12 мкм и поляризационных индикатрис рассеяния в видимой области спектра [20–23]. На основе полученных данных были созданы однопараметрические модели коэффициентов аэрозольного ослабления [21] и угловых характеристик рассеяния для видимой области спектра [22].

Аридная зона. В приземном слое атмосферы аридной зоны Казахстана в 1984–1988 гг. для трех сезонов года — весна, лето и осень — был проведен цикл комплексных исследований оптических и микрофизических характеристик аэрозоля. Выявлено, что в аридной зоне ярко выражен сезонный ход субмикронной $\alpha_f(\lambda)$ и грубодисперсной $\alpha_c(\lambda)$ компонент коэффициента аэрозольного ослабления в области спектра $\lambda = 0,44–11,5$ мкм [24]: максимальные значения $\alpha_f(\lambda)$ наблюдаются весной, а минимальные — летом. Показано, что при отсутствии пыльных бурь в аридной зоне средние значения коэффициентов аэрозольного ослабления примерно в 2–5 раз меньше, чем в других климатических зонах. На основе результатов измерений была разработана двухпараметрическая модель для расчета аэрозольного ослабления в области спектра $\lambda = 0,4–12$ мкм, входными параметрами которой являются коэффициенты ослабления на длинах волн 0,48 и 0,69 мкм [25]. Сопоставление коэффициентов ослабления $\alpha(\lambda)$ на протяженных трассах с результатами измерений в локальных объемах (ореольной индикатрисы рассеяния и функции распределения аэрозольных частиц по размерам) показало, что их значения можно использовать в качестве входных параметров эмпирических моделей [26], что важно для оперативной оценки оптического состояния атмосферы.

Активная спектрофелометрия в комплексных исследованиях. Создание малопараметрических моделей оптических характеристик и их микрофизическая интерпретация позволили выявить основные закономерности изменчивости характеристик, по образному и точному выражению Г.В. Розенберга, «запоминаемые атмосферой» среди большого количества разнообразных оптико-метеорологических ситуаций, реализующихся в приземном слое. Сформированные на этом этапе представления определили направление дальнейшего развития наших работ по исследованию «жизни аэрозоля» и созданию динамических эмпирических моделей. Перефразируя меткую мысль Г.В. Розенберга, подчеркнем: «...основным *постоянным свойством* атмосферного аэрозоля является его *постоянная изменчивость* во времени и пространстве» [5]. Отсюда следует, что даже хорошо статистически обеспеченные средние характеристики (оптические или микрофизические) имеют ограниченные возможности применения для решения практических задач, а значит, эмпирическая модель должна иметь измеряемые или прогнозируемые входные параметры.

Микрофизический состав частиц в конкретной атмосферной ситуации формируется под воздействием множества внутренних аэрозольных и внешних природных процессов. В свою очередь, эти процессы имеют собственные пространственно-временные ритмы и определенную взаимосвязь, следовательно, имеется возможность выявить в качестве входных параметров небольшое число измеряемых характеристик, которые имеют разный характер временной изменчивости и в которых суммарный отклик всех процессов проявляется наиболее сильно. Базовый микрофизический состав субмикронных частиц (их микроструктура и оптические постоянные, далее — «сухая основа» аэрозоля), наблюдаемый в конкретный момент, формируется в течение относительно продолжительного времени и зависит от времени жизни и траектории движения воздушной массы. Среди внешних факторов, определяющих быструю трансформацию микрофизических параметров частиц, ведущую роль играет относительная влажность воздуха, величина которой в рамках конкретной воздушной массы напрямую не связана с микрофизическими характеристиками аэрозольных частиц, а изменчивость регулируется относительно быстропротекающими процессами. Обратим внимание, что конденсационная активность аэрозоля определяется соотношением растворимых и нерастворимых веществ и их химического состава в сухой основе аэрозоля, следовательно, в общем случае она опосредованно зависит от процессов, определяющих микрофизический состав частиц. Исходя из такого представления о характерных (временных и пространственных) масштабах изменчивости аэрозоля, наряду с наблюдениями *in situ* необходимо осуществлять раздельное изучение характеристик «сухого аэрозоля» и его конденсационной активности при искусственном контролируемом изменении относительной влажности воздуха [27].

Исследования тропосферного аэрозоля (самолет-лаборатория) 1985–1995 гг.

Определяя план новой серии экспериментальных работ, мы руководствовались следующими соображениями: изучение явлений регионального масштаба требует либо проведения многоточечных измерений, либо использования высококомобильных средств, способных в ограниченное время охватить обширные территории. С учетом того, что понимание процессов трансформации характеристик аэрозольных частиц невозможно без знания их пространственно-временной изменчивости (что касается устойчивых воздушных масс, на первый план выходит их вертикальная изменчивость), была поставлена и решена задача создания самолета-лаборатории.

В середине 1970-х гг. самолетное зондирование носило эпизодический характер и было направлено в основном на разработку бортовых средств измерения параметров атмосферы и отработку методик зондирования характеристик воздуха и подстилающей поверхности. Но в 1985 г. был сформирован аппаратный состав летающей лаборатории: метеорологический и микрофизический измерительные комплексы, активный нефелометр со средствами термо- и гироскопии [28], спектрофотометрический комплекс и бортовая система регистрации. И с 1985 по 1991 г. самолетное зондирование проводилось почти во всех физико-географических и административных регионах бывшего СССР [28].

Эксперимент «ОДАЭКС-87». Совместно с ИФА АН СССР в прибрежном районе Одессы был проведен комплексный эксперимент, в котором принимали участие самолет-лаборатория ИОА и большой наземный комплекс аппаратуры. В составе наземного комплекса были задействованы две нефелометрические установки, измеритель спектральной оптической толщи атмосферы, установка для измерения индикатрис яркости в области околосолнечного ореола (все – ИФА), нефелометрическая установка с устройствами термо- и гироскопии, ореольный лазерный нефелометр, счетчик аэрозольных частиц, аспирационная установка для отбора аэрозольных проб на фильтры с целью проведения химического анализа, измеритель горизонтальной спектральной прозрачности (ИОА), а также полный комплект оборудования экспериментального метеорологического полигона проблемной научно-исследовательской лаборатории ОГМИ (Одесса). Здесь впервые были выявлены различия в термо- и гироскопических характеристиках аэрозоля для различных воздушных масс, обнаружен рост параметра конденсационной активности с высотой, проанализированы внутрисезонные циклы изменчивости коэффициентов рассеяния и концентрации частиц различных диапазонов размеров [29].

Эксперимент DUNA. Для изучения свойств пылевого аэрозоля пустынь Средней Азии осенью 1988 г. был проведен подготовительный эксперимент, а в сентябре 1989 г. – советско-американский эксперимент DUNA, в реализации которого приняло

участие множество исследовательских групп из ведущих организаций СССР и США. Самолет-лаборатория ИОА проводил зондирование вертикальных профилей и пространственного распределения оптико-микрофизических характеристик аэрозоля, его химического состава, а также метеопараметров атмосферы в исследуемом районе с повторяющимися контрольными посадками (или их имитацией) в аэропортах Душанбе, Курган-Тюбе, Термез. Для оценки общего оптического состояния атмосферы в регионе и пространственных масштабов пыльных бурь проводились отдельные патрульные разрезы (для одной-двух высот) по трассам Душанбе – Ташкент – Чимкент – Душанбе, Душанбе – Чарджоу – Бухара – Душанбе. В этом эксперименте был получен большой объем информации о микрофизическом и химическом составе пылевых частиц, а также о динамике их распространения в пространстве, что впервые позволило детально изучить вертикальные профили оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в диапазоне высот от 0 до 6 км для пыльных бурь Средней Азии [30, 31].

Полученный в 1985–1988 гг. обширный массив данных регулярного самолетного зондирования оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в атмосфере Западно-Сибирского региона (более чем 600 вертикальных профилей, измеренных во все сезоны года в разнообразных метеорологических и синоптических ситуациях), послужил основой создания первой версии эмпирической региональной модели оптических характеристик аэрозоля [32, 33].

Экспедиция «Атлантика-88». Первая в нашей практике судовая экспедиция по исследованию приводного аэрозоля с применением средств активной спектронефелометрии была проведена с марта по июнь 1988 г. в Атлантическом океане с широким охватом различных географических зон (от 25 до 68° с.ш.). Впервые было показано, что в условиях открытого океана при отсутствии заметного континентального воздействия термо- и гироскопические характеристики и микроструктура аэрозоля подобны для различных климатических зон [34, 35].

Цикл «Экология 1988–1995». На самолете-лаборатории ИОА Ан-30 «Оптик-Э» был проведен большой цикл комплексных экологических обследований территорий полуострова Камчатка, Прибайкалья и оз. Байкал, Буриятии, месторождений Мегион и Сомотлор, а также оценка экологического состояния воздушного бассейна гг. Нижний Тагил, Нижневартовск, Павлодар, Усть-Каменогорск, Амурск, Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре, Улан-Удэ, Кемерово [36].

На рубеже веков

В 90-е гг. XX в. Институт, как и вся отечественная наука, находился в весьма тяжелом положении. Но бесспорный международный авторитет и титанические усилия нашего руководителя академика В.Е. Зуева по сохранению ИОА СО РАН позволили нам пережить этот период. Следует вспомнить, что нам, первыми из иностранных участников, удалось

получить финансирование проекта (руководители В.Е. Зуев, Г.А. Титов) в новой фундаментальной программе по измерению радиационных характеристик атмосферы (Atmospheric Radiation Measurement – ARM, Pacific Northwest National Laboratory, USA, <https://www.arm.gov>). Участие большого числа специалистов в ежегодных совещаниях по программе ARM и презентация результатов по всему спектру деятельности ИОА СО РАН (например, [37]) определили возможность продолжения нашего участия уже в комплексном проекте, выполняемом совместно с ИФА РАН под руководством академика Г.С. Голицина.

Очень важную роль в этот период сыграли решения руководителей СО РАН: академика В.А. Коптюга, который в самые трудные годы смог поддержать ряд самолетных экспериментов; академика Н.Л. Добрецова, по инициативе которого было принято решение о регулярном финансировании экспедиций (в первую очередь связанных с продолжением длинных рядов наблюдений), а также работы стационаров и обсерваторий. Образование в 1992 г. РФФИ стало одним из ключевых факторов, обеспечивших существование работоспособных научных коллективов, сохранение, а в дальнейшем и развитие их материально-технической базы. Например, в 1995 г. был реализован проект «Самолетное исследование влияния антропогенных источников и лесных пожаров на климатическое и экологическое состояние региона оз. Байкал», что без финансовой поддержки гранта РФФИ было бы невозможно [38]. Наличие действующего самолета-лаборатории определило заключение в 1997 г. бессрочного соглашения с Национальным институтом исследования окружающей среды (Япония, <http://www.nies.go.jp>) по организации регулярного зондирования тропосферы в Западной Сибири в рамках раздела Международной геосферно-биосферной программы под руководством Gen Inoue. Это событие невозможно переоценить, поскольку с этого момента и по настоящее время в России только наш самолет-лаборатория ведет регулярное зондирование состава тропосферы [39]. Особо отметим, что в 1998 г. совместно с НПО «Вектор» были начаты долговременные самолетные исследования биологической компоненты тропосферного аэрозоля [40], и к сегодняшнему дню получен уникальный массив данных и результатов, не имеющих аналогов в мировой практике [41].

В те непростые годы участие Института в выполнении программ Президиума РАН, интеграционных и мультидисциплинарных проектов СО РАН, а затем появление специальной программы по импортозамещению и конкурсная система приобретения дорогостоящего оборудования из средств СО РАН и РФФИ дали возможность постепенного развития и расширения приборной базы.

Анализируя в целом вторую половину XX в., отметим, что появление лазеров, бурное развитие различных систем и устройств, работающих в оптическом диапазоне через атмосферу (зондирование, локация, навигация, наблюдения Земли из космоса и т.д.) в мировом научном сообществе обусловили

начало масштабных аэрозольных исследований. В это время был накоплен огромный экспериментальный материал, который лег в основу ряда хорошо известных специалистам моделей оптических характеристик атмосферы (см., например, [42–49]). Но на этом этапе основные усилия ученых были сосредоточены на изучении рассеивающих свойств атмосферных частиц, поскольку выбор спектрального диапазона работы приборов осуществлялся вне линий поглощения атмосферных газов. Гораздо меньше сведений в это время было получено об аэрозольном поглощении, главным образом из-за отсутствия соответствующих приборов. Но уже в конце века в связи с наблюдающимися климатическими изменениями в мировом научном сообществе сформировалось понимание острой необходимости детального изучения рассеивающих и поглощающих свойств атмосферного аэрозоля для проведения расчетов радиационных свойств атмосферы и подстилающей поверхности (особо актуальной проблемы для арктических и антарктических районов). Именно это обстоятельство определило интенсивное развитие инструментальной базы и начало нового цикла широкомасштабных комплексных экспериментов и рутинных наблюдений в мировом научном сообществе.

Современный этап (комплексный мониторинг и экспедиционные исследования в полярных и морских районах)

Требуемая для решения радиационных задач точность учета основных оптических характеристик аэрозоля и параметризации их изменчивости под влиянием сложного сочетания синоптических и метеорологических процессов не может быть достигнута только на основе ограниченных серий наблюдений. Даже в рамках отдельного региона создание разветвленной сети станций, где в мониторинговом режиме осуществлялось бы наблюдение всего необходимого комплекса аэрозольных характеристик – задача, не выполняемая по причинам экономического и технического характера.

Для изучения основных физических процессов и учета влияния геофизических факторов, определяющих «аэрозольную погоду» [50], мы выработали следующий подход к организации исследований. Он предполагает сочетание небольшого числа станций, работающих в режиме «исследовательского» мониторинга, с крупными комплексными экспериментами, в которых сосредоточено максимально доступное количество систем, обеспечивающих измерение большинства климатически значимых параметров атмосферы [51, 52]. Неотъемлемой составляющей при этом являются регулярные экспедиционные измерения с применением мобильных комплексов, базирующихся на самолете-лаборатории и научно-исследовательских судах.

Отметим, что под термином «исследовательский» мониторинг мы подразумеваем *постоянно развиваемую* систему рутинных автоматизированных

измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля. Важные задачи «исследовательского» мониторинга: регулярная обработка всего комплекса полученных данных, восстановление полного набора оптических характеристик аэрозоля *in situ* и их сопоставление с результатами, полученными непосредственно в атмосфере на горизонтальных и наклонных трассах. На этой основе проводится разработка новых методов, их аппаратурная реализация и интеграция в измерительный комплекс.

Приземный слой атмосферы

В 1992 г. были начаты измерения комплекса характеристик аэрозоля в приземной атмосфере на нашей первой мониторинговой TOR-станции в томском Академгородке (<http://lor.iao.ru/RU/tor/>) [53]. Сейчас на станции проводится измерение концентрации и функции распределения частиц в двух диапазонах размеров: 3–200 нм и 0,25–32 мкм. В 1997 г. в Академгородке начала работу Аэрозольная станция (<http://aerosol.iao.ru>). Каждый час осуществляется автоматическая регистрация коэффициентов рассеяния, массовой концентрации сажи в аэрозоле и массовой концентрации поглощающего вещества (далее по тексту – сажи, или $M_{\text{Всeq}}$). Поясним, что калибровка прибора для измерения поглощающего вещества осуществлена с применением сажевых частиц и данные измерений приводятся к эквиваленту массовой концентрации сажи $M_{\text{Всeq}}$ (мкг/м³). Ежедневно на станции проводится цикл измерений с применением установки активной спектрофелометрии [27] для определения значения параметра гигроскопической активности частиц и долевого содержания летучих соединений в аэрозоле. В 2008 г. на станции было начато измерение коэффициентов ослабления излучения на открытой горизонтальной трассе в области спектра $\lambda = 0,45\text{--}3,9$ мкм, а в 2010 г. заработал рутинный режим регистрации коэффициентов рассеяния в области ореола в диапазоне углов $\varphi = 1,2\text{--}20^\circ$ [54]. Особо следует отметить, что разработанный и созданный совместно с ИХКГ СО РАН диффузионный спектрометр сажи впервые в мировой практике обеспечил мониторинговые измерения распределения поглощающего вещества ($M_{\text{Всeq}}$) по размерам в субмикронном аэрозоле [55]. В 2013 г. диффузионный спектрометр сажи был установлен на Аэрозольной станции, и каждые 2 ч. он автоматически измеряет распределения сажи по размерам 10–1000 нм в приземном слое воздуха.

Для определения регионального фонового состояния аэрозольных характеристик с 1995 г. в разные периоды года мы проводили серии синхронных измерений в Академгородке и на фоновом полигоне ИОА СО РАН, расположенном в 60 км к юго-западу от г. Томска. С учетом острой необходимости постоянного мониторинга в фоновых условиях и по мере развития материальной базы здесь в 2008 г. была организована обсерватория «Фоновая», где осуществляются измерения функции распределения частиц по размерам в широком диапазоне. В 2014 г. в мониторинговый режим были введены приборы для регистрации коэффициентов рассеяния и массовой

концентрации «сажи». Отметим, что в районе Томска преобладают ветры юго-западного и западного направлений, таким образом, воздушные массы сначала проходят обсерваторию «Фоновая», затем Томск и Академгородок. Первые циклы наблюдений (1995–2005 гг.) показали, что влияние антропогенных источников города на состоянии приземного атмосферного аэрозоля сказывается незначительно. На основе анализа данных был сделан вывод о преимущественном влиянии мезомасштабных процессов на формирование «аэрозольной погоды» в приземном слое атмосферы в региональном масштабе [56], где определяющим фактором изменчивости аэрозольных характеристик является предыстория воздушных масс.

Сравнительный анализ данных одновременных измерений аэрозольной оптической толщи (АОТ) в Академгородке и фоновом районе в 1997–2008 гг. [57] показал, что изменчивость характеристик замутнения атмосферы в основном обусловлена синоптическими процессами. Было выяснено, что в летнее время значения АОТ в двух районах статистически неразличимы, а в холодный период в пригородной зоне в отдельных случаях наблюдалось более высокое замутнение атмосферы, по-видимому, обусловленное накоплением частиц аэрозоля под приземной температурной инверсией и расползанием городской «шапки» загрязнений. Результаты сравнения продолжающихся циклов синхронных наблюдений в двух пунктах свидетельствовали, что еще в 2008 г. существенных различий в дисперсном составе аэрозоля не наблюдалось [58]. Но интенсивное развитие инфраструктуры в Томске вблизи Академгородка в последующий период привело к заметному росту антропогенной аэрозольной нагрузки [59, 60].

Коротко суммируя основные результаты многолетних измерений в приземном слое атмосферы, отметим, что на этой основе были определены устойчивые закономерности межгодовой, сезонной и суточной изменчивости коэффициентов рассеяния, концентрации и функции распределения частиц по размерам, концентрации поглощающего вещества частиц, их параметра конденсационной активности и термооптических характеристик (см., например, [52–63]). Впервые были выявлены условия образования наночастиц (нуклеационных всплесков) в приземном слое атмосферы бореальной зоны Западной Сибири, произведена классификация всплесков, определены их основные характеристики и статистика повторяемости [64–66].

Исследование АОТ атмосферы в Сибири

Основываясь на развиваемой в Институте концепции «оптической погоды» [67] и вытекающей отсюда необходимости комплексных регулярных наблюдений, отметим, что одним из наиболее важных аспектов изучения различных масштабов ее пространственно-временной изменчивости является необходимость получения информации о характеристиках аэрозоля во всем столбе атмосферы.

Оптико-микрoфизические характеристики дымов сибирских лесных пожаров

В качестве такой характеристики используется величина АОТ для разных длин волн солнечного спектра. По данным озонметрических станций страны [68] для всей территории СССР в ИОА были разработаны карты распределения спектральной прозрачности атмосферы и аэрозольного ослабления [69]. В этой работе для каждого месяца года и для шести длин волн в диапазоне $\lambda = 0,344\text{--}0,627$ мкм показано, что на территории страны наблюдается сложное, многозональное распределение АОТ, выделены районы с ее повышенными значениями, а также определены зоны минимальных значений. На основе разработанных карт и результатов самолетного зондирования счетной концентрации частиц проведен анализ состояния аэрозольной атмосферы в различных барических образованиях.

Потребности науки и практики обусловили развитие приборной базы, и для изучения оптических характеристик в столбе атмосферы и последующего восстановления параметров микроструктуры, фактора асимметрии индикатрисы и альbedo однократного рассеяния аэрозоля (см., например, [70]) стали широко использоваться солнечные фотометры.

Измерения спектральных АОТ в районе Томска (Академгородок и обсерватория «Фоновая») начались в 1992 г. с использованием солнечных фотометров типа SP (диапазон спектра 0,34–4 мкм), разработанных в ИОА СО РАН [71]. Благодаря более широкому диапазону спектра этих фотометров впервые получены данные о спектральной зависимости и изменчивости АОТ в ближней ИК-области спектра [72]. Значимым событием для развития исследований АОТ в 2001 г. стала встреча с руководителем международной сети AERONET (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>) [73] Брентом Холбеном. Его энтузиазм и активная деятельность уже в 2002 г. обеспечили подписание соглашения с NASA (GSFC, USA) о создании под руководством ИОА СО РАН разветвленной сети фотометрических измерений АЭРОСИБНЕТ на территории России (Томск, фоновые районы вблизи Якутска, Уссурийска, Иркутска, Екатеринбургa, Звенигорода).

Анализ изменчивости АОТ в различных масштабах колебаний показал [74–76]: в многолетней изменчивости АОТ в поствулканический период (после 1994 г.) отсутствует трендовая составляющая; самые большие вариации (около 75%) обусловлены сменой воздушных масс и барических образований; следующим по значимости является сезонный ход; минимальный вклад вносят суточные колебания (10–20%). На основе многолетних данных проведена детализация среднего годового хода АОТ [77]: первый максимум наблюдается в начале мая ($\tau_{0,5}^a = 0,25$), второй – в июле, а минимум – в ноябре ($\tau_{0,5}^a = 0,05$). Наличие результатов регулярных наблюдений в разных географических районах позволило не только выявить особенности пространственного распределения АОТ в азиатской части России, но и развить метод флюид-локации для восстановления поля аэрозольного замутнения атмосферы и его трансформации в процессе перемещения воздушных масс [78].

Импульсом для начала наших исследований оптических характеристик аэрозолей горения биомассы послужили широко обсуждаемые в 70–80 гг. XX в. проблемы климатических последствий ядерной войны [79]. В свою очередь, в Сибири дымов природных пожаров в теплое время года являются неотъемлемой составляющей «аэрозольной погоды» и, следовательно, важным климатически значимым фактором (по данным мониторинга на всех станциях, в этот период дымная мгла наблюдается в среднем около 40 дней) (см., например, [80, 81]). За прошедшие десятилетия в ИОА СО РАН проведен большой цикл исследований оптических свойств и микроструктуры дымовых аэрозолей при поступлении в регион шлейфов дымов сибирских лесных пожаров и в контролируемых условиях Большой аэрозольной камеры (БАК). Комплексные эксперименты в БАК позволили впервые установить, что температурный режим горения является определяющим фактором формирования оптических и микрoфизических свойств дымовых аэрозолей [82]. Показано, что режим пламенного горения лесных горючих материалов является основным источником генерации частиц с высоким содержанием поглощающего вещества (альbedo однократного рассеяния до $\omega \approx 0,3\text{--}0,4$) и высоким значением параметра конденсационной активности частиц $\gamma \approx 0,5$. В режиме пиролиза (тления), наоборот, образуется большое количество частиц со слабым поглощением ($\omega \approx 0,9\text{--}1,0$) и низкой конденсационной активностью ($\gamma < 0,1$) [83].

Недавние исследования физико-химических характеристик дымов подтвердили определяющую роль режима горения в формировании морфологии и химического состава дымовых аэрозолей. Установлено, что частицы дымов открытого горения отличаются высокой концентрацией тонкодисперсных частиц сажи с морфологией агломератов первичных частиц и низким отношением органического углерода (ОС) к элементному (ЕС), что и определяет большую поглощательную способность видимого излучения. Дымы тления обладают слабым поглощением из-за доминирующей группы органических частиц с высоким отношением ОС/ЕС [84, 85].

Измерения характеристик аэрозольного рассеяния и поглощения в шлейфах дымов сибирских лесных пожаров, поступающих в Томский регион, показали, что приход дымной мглы сопровождается уменьшением относительного содержания поглощающего вещества («сажи») в частицах $P = M_{\text{BCeq}}/M_A$, (M_A – массовая концентрация субмикронного аэрозоля в сухой основе частиц). Было предложено использовать значения P ниже 0,05 как индикаторный признак для индикации прихода дымной мглы в район измерений. Этот критерий применяется нами в повседневном анализе данных мониторинга [86].

Исследование оптических свойств и микрофизического состава атмосферного аэрозоля над океаном

Еще в XX в. был проведен большой объем исследований механизмов генерации частиц с поверхности морской воды (см., например, [15, 17]). Но учитывая исключительно важную (а вероятно и решающую) роль океана в климатической системе планеты [87], следует отметить, что ранее предложенные аэрозольные модели уже не могут обеспечить оценку радиационных характеристик атмосферного аэрозоля для решения климатических задач. Океан, занимающий более 70% площади планеты и обладающий высокой теплоемкостью, с одной стороны, является инерционной средой, накапливающей тепловую энергию, а с другой — служит главным источником поступления в атмосферу наиболее сильного парникового газа (H_2O). Именно эти свойства определяют самые высокие требования к точности расчетов потоков излучения, приходящего на поверхность океана, для решения климатических задач. Отметим, что большинство полученных ранее данных измерений оптических и микрофизических характеристик морского аэрозоля и разработанных аэрозольных моделей не содержат сведений о его поглощающих свойствах как в приводном слое, так и по всей толще атмосферы.

Учитывая актуальность этой проблемы, наш коллектив совместно с ААНИИ и ИО РАН уже 30 лет ведет экспедиционные исследования аэрозольных характеристик в различных районах Мирового океана (рис. 1). В измерениях параметров аэрозоля (АОТ, функции распределения частиц по размерам и концентрации поглощающего вещества) используется комплект приборов, состоящий из портативных солнечных фотометров, SPM и/или Microtops II, счетчиков частиц АЗ-10 и аэталометров МДА. На первом этапе (1989–1996 гг.) изучались особенности пространственного распределения АОТ в различных районах Атлантики (10° ю.ш., 60° с.ш.), влияние выносов континентального аэрозоля и динамика «аэрозольного облака» после извержения вулкана Пинатубо. Были впервые получены статистически обоснованные данные спектральной зависимости АОТ в широком диапазоне спектра (0,34–4 мкм) и проведено районирование АОТ над Северной и Центральной Атлантикой [88, 89]. Результаты судовых измерений использовались в валидации спутниковых алгоритмов восстановления АОТ над океаном в рамках международного сотрудничества [90–93]. Дальнейшим развитием стало участие в программе Maritime Aerosol Network [94], являющейся компонентой сети AERONET. Основой при создании базы данных MAN/AERONET послужили результаты наших измерений АОТ фотометрами Microtops в 2004 г. К настоящему времени на сайте MAN/AERONET накоплены данные измерений разных авторов примерно в 400 экспедициях (рейсах) в различных районах океана. Полученная информация используется в задачах

космического зондирования и служит основой для разработки и тестирования моделей атмосферного аэрозоля [95].

Созданная база данных на сегодняшний день наиболее представительна по совокупности характеристик аэрозоля (спектральные АОТ, концентрации аэрозоля и сажи, ионный состав) и географическому охвату: 46 экспедиций в четырех океанах и данные измерений на полярных станциях (Баренцбург, Тикси, Мыс Баранова, Мирный, Восток). Анализ полученных данных показал, что часть вариаций характеристик аэрозоля обусловлена зависимостью от скорости ветра и влажности, но основное влияние на межсуточную изменчивость и пространственные неоднородности оказывают выносы в морскую атмосферу континентальных аэрозолей различного типа. На основе многолетних исследований впервые определено среднее широтное распределение (с шагом 5°) характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике от Ла-Манша до Антарктиды [96] и предложены эмпирические модели зонального распределения [97].

В условиях быстрых климатических изменений наиболее остро стоит задача определения физико-химических характеристик аэрозоля в высокоширотных районах океана [98]. Особое значение придается изучению поглощающего аэрозоля [99], который снижает как альbedo однократного рассеяния аэрозоля, так и альbedo снежного покрова. На основе результатов нескольких экспедиций выполнены первые оценки среднего распределения аэрозоля над арктическими морями (от Баренцева до Чукотского) [100]. Показано, что большинство характеристик уменьшается с запада на восток: АОТ (0,5 мкм) уменьшается от 0,078 до 0,028, концентрации аэрозоля — от 3,2 до 1,4 см^{-3} , концентрации сажи — от 40 до 20 $\text{нг} \cdot \text{м}^{-3}$. В 2009 и 2011 гг. впервые проведены уникальные наблюдения характеристик приземного аэрозоля на российской антарктической станции «Восток». Было обнаружено, что минимум концентрации аэрозоля и сажи (0,43 см^{-3} и 10 $\text{нг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно) наблюдается в июне — августе, а максимум (0,99 см^{-3} и 19 $\text{нг} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно) — в ноябре — апреле [101].

Самолет-лаборатория в исследовании аэрозоля в тропосфере Западной Сибири и Российской субарктики

Как уже отмечалось, в 1997 г. был начат цикл ежемесячных комплексных исследований состава тропосферы с применением самолета-лаборатории [38] на юге Новосибирской обл. (пос. Завьялово). В отличие от самолетных измерений, проводимых в период 1986–1988 гг., здесь были включены измерения поглощающего вещества в составе субмикронной фракции аэрозоля. Сопоставление данных двух циклов наблюдений, 1986–1988 и 1997–2016 гг., показало, что высотные профили коэффициента аэрозольного рассеяния хорошо согласуются друг с другом. Этот факт дал основание заключить, что и данные по поглощающим свойствам аэрозоля

вполне адекватно описывают его характеристики в исследуемом регионе, отражают основные черты «аэрозольной погоды» и могут быть использованы при разработке эмпирических моделей [102–105].

Для исследования аэрозоля в тропосфере Российской субарктики в 2008 г. в рамках международного полярного года и проектов POLARCAT (совместно с Norsk institutt for luftforskning, Норвегия) и YAK-AEROSIB [106] (совместно с НЦНИ, Франция) были выполнены два цикла маршрутного самолетного зондирования в приполярных широтах. Первый рейс (с 7 по 12 июня) проходил по маршруту Новосибирск – Салехард – Хатанга – Чокурдах – Певек – Чокурдах – Якутск – Мирный, второй рейс (с 21 по 29 июля) – по маршруту Новосибирск – Мирный – Якутск – Ленск – Братск. Отметим, что на приполярных маршрутных участках Хатанга – Чокурдах и Чокурдах – Певек – Чокурдах полеты выполнялись в условиях экстремально высокой прозрачности. Здесь на всех высотах были зарегистрированы предельно низкие уровни концентрации аэрозоля (менее 1 мкг/м^3) и «сажи» (около $0,05 \text{ мкг/м}^3$). Ранее не встреченной нами интересной особенностью распределения коэффициента рассеяния и массовой концентрации «сажи» по высоте был инверсный характер профиля, при котором от приземного слоя до 7 км наблюдался рост значений этих параметров с высотой. Более того, минимальные значения отношения массовой концентрации поглощающего аэрозоля к его общей массе (параметр P) наблюдались в нижнем слое атмосферы, а выше 3 км регистрировались отдельные слои, где P достигал значений 0,10–0,15. Эти факты свидетельствуют о том, что в приземном слое атмосферы в этих широтах ($70\text{--}72^\circ \text{ с.ш.}$), во-первых, отсутствуют какие-либо источники поглощающего аэрозоля и, во-вторых, высокие значения P на больших высотах свидетельствуют о поступлении в этот регион загрязненного воздуха от удаленных промышленных источников (напомним, что в природных пожарах $P < 0,5$ [86]). Продолжение цикла исследований YAK-AEROSIB в апреле 2010 и в июле 2013 г. по маршруту Новосибирск – Мирный – Якутск – Ленск – Новосибирск показало, что величины аэрозольных характеристик, зарегистрированных здесь в весенних и летних условиях, вполне соответствовали среднему региональному состоянию атмосферы.

15–17 октября 2014 г. были выполнены четыре полета самолета-лаборатории в Российскую субарктику к Карскому морю ($55,0\text{--}74,8^\circ \text{ с.ш.}$, $61,3\text{--}82,9^\circ \text{ в.д.}$): № 1 – Новосибирск – Салехард; № 2 – Салехард – Карское море (восточный сектор, севернее пос. Диксон) – Салехард; № 3 – Салехард – Карское море (западный сектор, южнее о-ва Новая Земля) – Салехард; № 4 – Салехард – Новосибирск. Отметим, что на всех участках маршрута в этот период, как и в полетах 2008 г., на высотах 4–6 км наблюдались максимумы параметра $P \approx 0,10\text{--}0,18$, что свидетельствует о поступлении в атмосферу над акваторией Карского моря шлейфов промышленных загрязнений.

Уникальные результаты были получены в самолетной экспедиции с 31 июля по 1 августа 2012 г. по маршруту Новосибирск – Томск – Якутск – Новосибирск, которая проводилась в условиях экстремально сильных природных пожаров на обширной территории Томской обл., Красноярского края и Якутии. Во время этих полетов была собрана информация о комплексе оптических и микрофизических характеристик как в «фоновых» условиях атмосферы Западной Сибири и в арктических районах страны, так и при воздействии пожаров различной мощности [107].

Результаты самолетных измерений оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в период пожаров позволили количественно оценить мощность источников и эволюцию дымовых шлейфов [108]. Подробная информация о концентрации и распределении сажевых частиц по высоте [109] была использована при анализе источников, пространственных и временных вариаций в воздухе северных районов России [110, 111], а также для верификации спутниковых методов оценки поступления сажи в период сибирских пожаров [112]. Результаты численного моделирования, проведенного на основе восстановленных радиационно-значимых характеристик аэрозоля в тропосфере по эмпирическим наземным и самолетным данным для «фонового» и «задымленного» состояний, показали, что суточный дефицит суммарной солнечной радиации, обусловленный появлением оптически плотного дыма на уровне подстилающей поверхности, составляет около 13 Мдж/м^2 [113], и, следовательно, дымная мгла выступает как выхолаживающий фактор. В то же время наличие большого количества поглощающих частиц в атмосфере приводит к нагреву центральной части дымового слоя на высотах 3–4 км, где изменение температуры за сутки составляет около $2,5^\circ \text{ C}$ при $\tau_{\text{дым}} = 2$, достигая $5,5^\circ \text{ C}$ при $\tau_{\text{дым}} = 4$, способствуя увеличению времени жизни дымной мглы, что должно быть учтено при прогнозе ее распространения [114].

Заключение

В последние десятилетия особое внимание ученых сосредоточено на исследовании вклада органических веществ в состав аэрозоля в условиях реальной атмосферы – это проблема, которая и на сегодняшний день слабо изучена (см., например, [115]). С 2013 г. в ИОА СО РАН в сотрудничестве с ИХН, ИХКГ и ИВМ МГ СО РАН также реализуется программа «Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики» [116–120]. Как показывают результаты современных исследований (см., например, [116]), доля органических соединений в массовой концентрации субмикронных частиц варьируется от 20 до 70%, а в микродисперсном диапазоне размеров может достигать 90% (!). Было выяснено, что органическая составляющая этих частиц в большинстве своем содержит водорастворимые соединения (см., например, [121]). Эти факты заставляют по-новому интерпретировать некоторые устоявшие

ся точки зрения на источники и механизмы рождения частиц в процессе «газ–частица» (при теоретическом описании этого процесса до сих пор не выяснена роль паров воды на начальной стадии образования зародыша и последующей стадии кластеризации).

Обратимся к цитате из работы Г.В. Розенберга: «По данным хроматографических измерений Ф. Уента (F.W. Went), доказавших, что, во всяком случае, значительная часть ядер Айткена является биогенной или антропогенной, средняя концентрация продуктов распада терпеноподобных веществ в атмосфере составляет около 104 мкг/м^3 (т.е. порядка 10^6 тонн во всем объеме атмосферы) и общая их продукция на земном шаре близка к $5\text{--}10^8$ тонн в год. <...> Представляется, что изучение природы и происхождения ядер Айткена и механизма их разрастания в присутствии атмосферной влаги становится, таким образом, одной из важнейших проблем не только оптики, но и термодинамики и химии атмосферного аэрозоля, ибо, как теперь ясно, ядра Айткена выступают как один из важнейших факторов, определяющих ход конденсационных, а тем самым и погодообразующих процессов» [5]. Подчеркнем, что осмысление этой проблемы и ее важности для понимания «жизни аэрозоля» обсуждается в работе 1968 г.

Первые результаты измерений природных фотохимических дымок были опубликованы в 1976 г. [121]. Но понадобились еще долгие годы до начала широкомасштабных исследований и получения надежных результатов [122]. Этот пример, на наш взгляд, очень ярко показывает, насколько многогранен объект исследования и сколько времени и труда ученых необходимо для создания адекватной приборной базы и проведения длительных измерений для достижения новых результатов.

Завершая обзор, надеемся, что этот материал и библиография будут полезны молодым научным сотрудникам, начинающим свой путь, в поиске интересных и важных задач изучения аэрозоля в атмосфере.

В заключение авторы статьи сердечно благодарят большой коллектив сотрудников Института, которые на протяжении всех 50 лет на разных этапах участвовали в развитии методологии, создании аппаратуры и делили вместе со всеми удачу и многочисленные трудности. Также следует особо отметить, что продвижение было бы невозможно без тесного, дружественного сотрудничества со многими коллективами отечественных и зарубежных научных организаций. Всем ученым, с которыми мы вместе работали в экспедициях, встречались на конференциях, спорили и обменивались идеями, готовили публикации, работали над совместными проектами – наша глубокая признательность.

Обсуждаемые в работе результаты были получены в рамках основной тематики ИОА СО РАН и в разные годы поддержаны грантами РФФИ, ФЦП, программы РАН и СО РАН. Получение в 2019 г. финансирования по проекту РНФ (соглашение № 19-77-20092) в номинации «Проведение исследований на базе существующей научной инфраструктуры мирового уровня», несомненно, будет способствовать раз-

витию изучения такого уникального объекта, как атмосферный аэрозоль.

1. Зуев В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей. М.: Советское радио, 1966. 317 с.
2. Пясковская-Фесенкова Е.В. Исследования рассеяния света в земной атмосфере. М.: Изд. АН СССР, 1957. 220 с.
3. Бартенева О.Д. Индикатрисы рассеяния света в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Геофизика. 1960. № 12. С. 852–860.
4. Розенберг Г.В. Свойства атмосферного аэрозоля по данным оптического исследования // Изв. АН СССР. ФАО, 1967. Т. 3, № 9. С. 936–949.
5. Розенберг Г.В. Оптические исследования атмосферного аэрозоля // Успехи физ. наук. 1968. Т. 95, вып. 1. С. 159–208.
6. Торопова Т.П. О некоторых свойствах атмосферного аэрозоля // Тр. АФИ АН Каз. ССР. 1969. Т. 13. С. 55–62.
7. Кондратьев К.Я., Бадинов И.Я., Ивлев Л.С., Никольский Г.А. Аэрозольная структура тропосферы и стратосферы // Изв. АН СССР. ФАО. 1969. Т. 5, № 5. С. 480–493.
8. Георгиевский Ю.С., Розенберг Г.В. Влажность как фактор изменчивости аэрозоля // Изв. АН СССР. ФАО. 1973. Т. 9, № 2. С. 126–138.
9. Розенберг Г.В. О природе аэрозольного поглощения в коротковолновой области спектра // Изв. АН СССР. ФАО. 1978. Т. 15, № 12. С. 1280–1292.
10. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. Статистическая модель оптических характеристик атмосферного аэрозоля // Изв. АН СССР. ФАО. 1979. Т. 15, № 1. С. 53–60.
11. Любовцева Ю.С., Юдин Н.И., Мельников Н.В. Исследование характеристик и процессов трансформации природного аэрозоля // Изв. АН СССР. ФАО. 1981. Т. 17, № 7. С. 716–724.
12. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 370 с.
13. Зуев В.Е., Наац И.Э. Обратные задачи лазерного зондирования атмосферы. Новосибирск: Наука, 1982. 242 с.
14. Розенберг Г.В. Возникновение и развитие атмосферного аэрозоля – кинетические обусловленные параметры // Изв. АН СССР. ФАО. 1983. Т. 19, № 1. С. 21–35.
15. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Аэрозольные модели атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 104 с.
16. Кабанов М.В., Панченко М.В. Рассеяние оптических волн дисперсными средами. Ч. III. Атмосферный аэрозоль. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1984. 189 с.
17. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1986. 295 с.
18. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1986. 360 с.
19. URL: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_reports.shtml (last access: 2.03.2019).
20. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Щелканов Н.Н. Влияние скорости ветра на аэрозольное ослабление оптической радиации в атмосфере морских акваторий // Изв. АН СССР. ФАО. 1987. Т. 23, № 3. С. 324–327.
21. Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н. Статистические характеристики аэрозольного ослабления оптической радиации в дымках прибрежной зоны моря // Оптика атмосф. и океана. 1988. Т. 1, № 6. С. 16–22.
22. Panchenko M.V., Kabanov M.V., Fadeev V.Ya. Statistical model of directed light scattering coefficients of coastal haze // JOSA, 1985. V. 2, iss. 10. P. 1735–1738. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.2.001735> (last access: 2.03.2019).

23. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретников В.В., Ужегов В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
24. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н. Аэрозольное ослабление оптического излучения в атмосфере аридной зоны // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 10. С. 1318–1329.
25. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А. Двухпараметрическая модель аэрозольного ослабления для атмосферных дымок // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 12. С. 1089–1092.
26. Панченко М.В., Полькин В.В., Пхалагов Ю.А., Щелканов Н.Н. Статистические связи оптических и микрофизических характеристик аэрозоля аридной зоны // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6, № 8. С. 905–912.
27. Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Terpugova S.A., Kozlov V.S. Active spectral nephelometry as a method for the study of submicron atmospheric aerosols // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29, iss. 9. P. 2567–2583.
28. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Панченко М.В. Основные результаты самолётного зондирования аэрозоля в ИОА СО РАН (1981–1991 гг.) // Оптика атмосфер. и океана. 1995. Т. 8, № 1–2. С. 131–156.
29. Результаты комплексного аэрозольного эксперимента ОДАЭКС-87: Сб. ст. / Отв. ред. В.Я. Фадеев. Томск: ТНЦ СО АН СССР, 1989. 144 с.
30. Andronova A.V., Belan B.D., Gillette D.A., Isakov A.A., Zhukov V.M., Zhukovskii D.A., Kolomiets S.M., Panchenko M.V., Sviridenkov M.A., Smirnov V.V., Sokolik I.N. Microphysical characteristics of the dust aerosol measured during the Soviet-American experiment (Tadzhikistan, 1989) // Atmos. Environ. 1993. V. 27A, N 16. P. 2481–2487. DOI: 10.1016/0960-1686(93)90019-U.
31. Panchenko M.V., Terpugova S.A., Bodhaine B.A., Isakov A.A., Sviridenkov M.A., Sokolik I.N., Romasheva E.V., Nazarov B.I., Shukurov A.K., Chistyakova E.I., Johnson T.C. Optical investigations of dust storms during USSR-US experiments in Tadzhikistan, 1989 // Atmos. Environ. 1993. V. 27A, N 16. P. 2503–2509.
32. Panchenko M.V., Terpugova S.A., Tumafov A.G. Annual variations of submicron aerosol fraction as assessed from the data of airborne nephelometric measurements // Atmos. Res. 1996. V. 41. P. 203–215.
33. Панченко М.В., Терпугова С.А., Полькин В.В. Эмпирическая модель оптических характеристик аэрозоля нижней тропосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1998. Т. 11, № 6. С. 615–624.
34. Панченко М.В., Тумаков А.Г. Исследование термодинамических характеристик атмосферного аэрозоля в Атлантическом океане // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 7. С. 886–893.
35. Панченко М.В., Полькин В.В., Голобокова Л.П., Чубаров М.П., Нецетаева О.Г., Домышева В.М. Влияние континента на дисперсный и химический состав приводного аэрозоля Атлантики // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 7. С. 741–750.
36. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
37. Zuev V.E., Belan B.D., Panchenko M.V., Pol'kin V.V., Terpugova S.A., Tumafov A.G. Airborne studies of submicron aerosol in the troposphere over West Siberia // Proc. Fifth ARM Sci. Team Meeting, 19–23 March, 1995. San Diego, California. P. 241–243.
38. Панченко М.В., Белан Б.Д., Шаманаев В.С. Роль самолета-лаборатории ИОА СО РАН в изучении окружающей среды оз. Байкал // Оптика атмосфер. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 463–472.
39. Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Zhidovkin E.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Shamanaev V.S., Shmargunov V.P. Optik-É AN-30 aircraftlaboratory: 20 years of environmental research // Atmos. Ocean. Technol. 2012. V. 29, N 11. P. 64–75.
40. Safatov A., Buryak G., Andreeva I., Olkin S., Reznikova I., Sergeev A., Belan B., Panchenko M., Simonenkov D., Tolmachev G. Altitude profiles of biogenic components of atmospheric aerosols in southwestern Siberia // Chem. Eng. Transact. 2008. V. 16. P. 225–232.
41. Андреева И.С., Сафатов А.С., Мокрушина О.С., Буряк Г.А., Пучкова Л.И., Мазуркова Н.А., Бурцева Л.И., Калмыкова Г.В. Инсектицидная, антимикробная и противовирусная активность штаммов *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki*, выделенных из атмосферных аэрозолей юга Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 483–490; Andreeva I.S., Safatov A.S., Mokrushina O.S., Buryak G.A., Puchkova L.I., Mazurkova N.A., Burtseva L.I., Kalmykova G.V. Insecticidal, antimicrobial, and antiviral activity of *Bacillus thuringiensis* ssp. *kurstaki* strains isolated from atmospheric Aerosols in the South of Western Siberia // Atmos. Ocean. Opt. 2014, V. 27, N 6. P. 479–486.
42. Elterman L. Vertical attenuation model with eight surface meteorological ranges 213 kilometers // Report AFCRL-70-0200 AFCRL Bedford, Mass. 1970. 68 p.
43. Toon O.B., Pollack J.B. A global average model of Atmospheric aerosols for radiativ transfer calculations. // J. Appl. Math. 1976. V. 15. P. 225–246.
44. Shettle E.P., Fenn R.W. Models for the lower atmosphere and the effects of humidity variations on their optical properties // Report AFCRL-TR-79-0214. 1979. 94 p.
45. Kneizys F.X., Shettle E.P., Gallery W.O., Chetwynd J.H.Jr., Abreu L.W., Selby J.E.A., Fenn R.W., McClatchey R.A. Atmospheric transmittance radiance // Environ. Res. Papers. 1980. № 697. P. 21–41.
46. Кондратьев К.Я., Поздняков Д.В. Аэрозольные модели атмосферы. М.: Наука, 1981. 103 с.
47. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982. 200 с.
48. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптические модели атмосферного аэрозоля. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1986. 295 с.
49. Kneizys F.X., Abreu L.W., Anderson G.P., Chetwynd G.H., Shettle E.P., Berk A., Bernstein L.S., Robertson D.S., Acharya P., Rothman L.S., Selby J.E.A., Gallery W.O., Clouth S.A. The Modtran 2/3. Report and Lowtran 7 model. Phillips Laboratory. Massachusetts: Hanscon, 1996. 230 p.
50. Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Рахимов Р.Ф., Сакерин С.М., Белан Б.Д. Геофизические факторы формирования аэрозольной погоды Западной Сибири // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 10. С. 922–934.
51. Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Yu.S., Eremina T.A., Kozlov V.S., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Yaushcheva E.P., Chernov D.G., Odintsov S.L., Burlakov V.D., Arshinov M.Yu., Ivlev G.A., Savkin D.E., Fofonov A.V., Gladkikh V.A., Kamaradin A.P., Belan D.B., Grishaev M.V., Belov V.V., Afonin S.V., Balin Yu.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E.,

- Samoilova S.V., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Davydov D.K., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Belan S.B., Shmargunov V.P., Voronin B.A., Serdyukov V.I., Polovtseva E.R., Vasil'chenko S.S., Tikhomirova O.V., Ponomarev Yu.N., Romanovskii O.A., Sinitsa L.N., Marichev V.N., Makarova M.V., Safatov A.S., Kozlov A.S., Malyshkin S.B., Maksimova T.A.* Instrumentation complex for comprehensive study of atmospheric parameters // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5651–5676. DOI: 10.1080/01431161.2014.945015.
52. *Matvienko G.G., Belan B.D., Panchenko M.V., Romanovskii O.A., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Y.S., Eremina T.A., Kozlov V.S., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P., Chernov D.G., Zhuravleva T.B., Bedareva T.V., Odintsov S.L., Burlakov V.D., Nevzorov A.V., Arshinov M.Y., Ilev G.A., Savkin D.E., Fofonov A.V., Gladkikh V.A., Kamardin A.P., Balin Y.S., Kokhanenko G.P., Penner I.E., Samoilova S.V., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Davydov D.K., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Belan S.B., Shmargunov V.P., Kozlov A.S., Malyshkin S.B.* Complex experiment on studying the microphysical, chemical, and optical properties of aerosol particles and estimating the contribution of atmospheric aerosol-to-earth radiation budget // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. 8. P. 4507–4520. DOI:10.5194/amt-8-4507-2015.
53. *Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофонов А.В.* Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОР-станции ИОА СО РАН // *Оптика атмосф. и океана.* 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; *Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ilev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V.* Monitoring of Atmospheric Parameters: 25 Years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // *Atmos. Ocean. Opt.* 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.
54. *Pol'kin V.V., Pol'kin Vas.V.* Inter-annual and seasonal variability of the diurnal behavior of aureole scattering phase function at the aerosol monitoring station of LOA IAO SB RAS in 2010–2014 // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9680. DOI: 10.1117/12.2205780.
55. *Kozlov V.S., Shmargunov V.P., Panchenko M.V., Chernov D.G., Kozlov A.S., Malyshkin S.B.* Seasonal variability of the Black Carbon size distribution in the atmospheric aerosol // *Russ. Phys. J.* 2016. V. 58, N 12. P. 1804–1810.
56. *Панченко М.В., Полькин В.В., Терпугова С.А., Туманов А.Г., Шмаргунов В.П., Яушева Е.П.* О формировании среднерегионального аэрозольного фона // *Оптика атмосф. и океана.* 1995. Т. 8, № 7. С. 1112–1114.
57. *Сакерин С.М., Кabanov Д.М., Насртдинов И.М., Турчинович С.А., Турчинович Ю.С.* Результаты двухточечных экспериментов по оценке антропогенного воздействия города на характеристики прозрачности атмосферы // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 12. С. 1108–1113; *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Nasrtdinov I.M., Turchinovich S.A., Turchinovich Yu.S.* The results of two-point experiments on the estimation of the urban anthropogenic effect on the characteristics of atmospheric transparency // *Atmos. Ocean. Opt.* 2010. V. 23, N 2. P. 88–94.
58. *Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В.* Влияние города Томска на химический и дисперсный состав атмосферного аэрозоля в приземном слое // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 6. С. 486–491.
59. *Таловская А.В., Симоненков Д.В., Филимоненко Е.А., Белан Б.Д., Язиков Е.Г., Рычкова Д.А., Ильенок С.С.* Исследование состава пылевого аэрозоля на фоновой и городской станциях наблюдения в Томском регионе зимой 2012–2013 г. // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 11. С. 999–1005.
60. *Яушева Е.П., Панченко М.В., Козлов В.С., Терпугова С.А., Чернов Д.Г.* Влияние города на аэрозольные характеристики атмосферы Академгородка г. Томска в переходные сезоны // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 11. С. 981–988.
61. *Козлов В.С., Панченко М.В., Яушева Е.П.* Временная изменчивость содержания субмикронного аэрозоля и сажи в приземном слое атмосферы Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 12. С. 1082–1085.
62. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Козлов В.С., Полькин В.В., Яушева Е.П.* Годовой ход конденсационной активности субмикронного аэрозоля в приземном слое атмосферы Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2005. Т. 18, № 8. С. 678–683.
63. *Панченко М.В., Терпугова С.А., Докукина Т.А., Полькин В.В., Яушева Е.П.* Многолетняя изменчивость конденсационной активности аэрозоля в г. Томске // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 4. С. 314–318; *Panchenko M.V., Terpugova S.A., Dokukina T.A., Pol'kin V.V., Yausheva E.P.* Multiyear variations in aerosol condensation activity in Tomsk // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 4. P. 251–255.
64. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Симоненков Д.В., Антохин П.Н.* Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть I. Классификация и повторяемость // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 9. С. 766–774.
65. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Козлов А.С., Аршинова В.Г.* Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть II. Скорости образования и роста наночастиц // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 8. С. 730–737.
66. *Nieminen T., Kerminen V.-M., Petäjä T., Aalto P.P., Arshinov M., Asmi E., Baltensperger U., Beddows D.C.S., Beukes J.P., Collins D., Ding A., Harrison R.M., Henzing B., Hooda R., Hu M., Hxrak U., Kivekäs N., Komsaare K., Krejci R., Kristensson A., Laakso L., Laaksonen A., Leaitch W.R., Lihavainen H., Mihalopoulos N., Németh Z., Nie W., O'Dowd C., Salma I., Sellegri K., Svenningsson B., Swietlicki E., Tunced P., Ulevicius V., Vakkari V., Vana M., Wiedensohler A., Wu Z., Virtanen A., Kulmala M.* Global analysis of continental boundary layer new particle formation based on long-term measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18, N 19. P. 14737–14756.
67. *Зуев В.Е., Белан Б.Д., Задде Г.О.* Оптическая погода. Новосибирск: Наука, 1990. 192 с.
68. *Гуцин Г.П.* Озонометрическая сеть СССР // *Метеорол. и гидрол.* 1979. № 3. С. 111–116.
69. *Белан Б.Д., Задде Г.О.* Спектральная прозрачность и аэрозольное ослабление над территорией СССР. Томск: Изд-во ТФ СО АН СССР, 1987. 180 с.

70. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Smirnov A., Sinyuk A., Schafer J., Giles D., Dubovik O. Aeronet's Version 2.0 quality assurance criteria // Proc. SPIE. 2006. DOI: 10.1117/12.706524.
71. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Ростов А.П., Турчинович С.А., Князев В.В. Солнечные фотометры для измерений спектральной прозрачности атмосферы в стационарных и мобильных условиях // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1112–1117; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Rostov A.P., Turchinovich S.A., Knyazev V.V. Sun photometers for measuring spectral air transparency in stationary and mobile conditions // Atmos. Ocean. Opt. 2013, V. 26, N 4. P. 352–356.
72. Сакерин С.М., Кабанов Д.М. Спектральная зависимость аэрозольной оптической толщи атмосферы в расширенном диапазоне спектра 0,34–4 мкм // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 2. С. 156–164.
73. Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanre D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y.J., Nakadjima T., Lavenu F., Jankowiak I., Smirnov A. AERONET – A federated instrument network and data archive for aerosol characterization // Remote Sens. Environ. 1998. V. 66, N 1. P. 1–16.
74. Кабанов Д.М., Курбаналиев Т.Р., Рассказчикова Т.М., Сакерин С.М., Хуторова О.Г. Влияние синоптических факторов на вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в условиях Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 8. С. 665–674; Kabanov D.M., Kurbanaliev T.R., Rasskazchikova T.M., Sakerin S.M., Khutorova O.G. The influence of synoptic factors on variations of atmospheric aerosol optical depth under Siberian conditions // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 6. P. 543–553.
75. Исследование радиационных характеристик аэрозоля в азиатской части России / под общ. ред. С.М. Сакерина. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2012. 484 с.
76. Кабанов Д.М., Береснев С.А., Горда С.Ю., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Сакерин С.М., Тащилин М.А. Дневной ход аэрозольной оптической толщи атмосферы в нескольких регионах азиатской части России // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 4. С. 291–296; Kabanov D.M., Beresnev S.A., Gorda S.Yu., Kornienko G.I., Nikolashkin S.V., Sakerin S.M., Tashchilin M.A. Diurnal behavior of aerosol optical depth of the atmosphere in a few regions of Asian part of Russia // Atmos. Ocean. Opt. 2013. V. 26, N 6. P. 466–472.
77. Сакерин С.М., Береснев С.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тащилин М.А., Турчинович Ю.С., Holben B.N., Smirnov A. Анализ подходов моделирования годового и спектрального хода аэрозольной оптической толщи атмосферы в регионах Сибири и Приморья // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1047–1058; Sakerin S.M., Beresnev S.A., Kabanov D.M., Kornienko G.I., Nikolashkin S.V., Poddubny V.A., Tashchilin M.A., Turchinovich Yu.S., Holben B.N., Smirnov A. Analysis of approaches to modeling the annual and spectral behaviors of atmospheric aerosol optical depth in Siberia and Primorye // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 2. P. 145–157.
78. Поддубный В.А., Сакерин С.М., Лужецкая А.П., Наговицына Е.С., Береснев С.А., Маркелов Ю.И. Мониторинг атмосферного аэрозоля с помощью спектральной солнечной фотометрии и метод флюид-локации атмосферы для восстановления среднего поля загрязнения // Вестн. УрО РАН. 2013/2 (44). С. 37–53.
79. Голицын Г.С., Гинзбург А.С. Природные аналоги ядерной катастрофы // Климатические и биологические последствия ядерной войны. М.: Наука, 1987. С. 100–123.
80. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // Int. J. Remote Sens. 2014. V. 35, iss. 15. P. 5722–5741.
81. Zhuravleva T., Kabanov D., Nasrtdinov I., Russkova T., Sakerin S., Smirnov A., Holben B. Radiative characteristics of aerosol under smoke mist conditions in Siberia during summer 2012 // Atmos. Meas. Tech. 2017. P. 179–198. URL: <http://www.atmos-meas-tech.net/10/179/2017>. DOI: 10.5194/amt-10-179-2017.
82. Козлов В.С., Панченко М.В., Тумаков А.Г. О влиянии режима сжигания углеводородных топлив на оптические свойства дымовых аэрозолей // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6, № 10. С. 1278–1288.
83. Козлов В.С., Рахимов Р.Ф., Шмаргунов В.П. Изменчивость конденсационных свойств смешанного дыма горения биомассы на различных стадиях его эволюции // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 10. С. 846–855; Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P. Variations in condensation properties of mixed smoke from biomass burning at different smoke evolution stages // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 1. P. 9–18.
84. Popovicheva O.B., Kozlov V.S., Rakhimov R.F., Shmargunov V.P., Kireeva E.D., Persiantseva N.M., Timofeev M.A., Engling G., Eleftheriadis K., Diapouli E., Panchenko M.V., Zimmermann R., Schnelle-Kreis J. Optical-Microphysical and physical-chemical characteristics of siberian biomass burning: experiments in aerosol chamber // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 6. P. 492–500.
85. Kalogridis A.-C., Popovicheva O.B., Engling G., Diapouli E., Kawamura K., Tachibana E., Ono K., Kozlov V.S., Eleftheriadis K. Smoke aerosol chemistry and aging of Siberian biomass burning emissions in a large aerosol chamber // Atmos. Environ. 2018. V. 185. P. 15–28.
86. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Yausheva E.P. Mass fraction of Black Carbon in submicron aerosol as an indicator of influence of smokes from remote forest fires in Siberia // Atmos. Environ. 2008. V. 42, N 11. P. 2611–2620.
87. Ланто С.С., Соков А.В., Терещенков В.П., Добролюбов С.А. Океан и колебания климата // Российская наука: выстоять и возвратиться. М. 1997. С. 245–251.
88. Sakerin S.M., Kabanov D.M. Spatial inhomogeneities and the spectral behavior of atmospheric aerosol optical depth over the Atlantic Ocean. Part 1 // J. Atmos. Sci. 2002. V. 59, N 3. P. 484–500.
89. Sakerin S.M., Kabanov D.M., Smirnov A.V., Holben B.N. Aerosol optical depth of the atmosphere over ocean in the wavelength range of 0,37–4 μm // Int. J. Remote Sens. 2008. V. 29, iss. 9. P. 2519–2547. DOI: 10.1080/01431160701767492.
90. Korotaev G.K., Sakerin S.M., Ignatov A.M., Stowe L.L., McClain E.P. Sun-photometer observations of aerosol optical thickness over the North Atlantic from a Soviet research vessel for validation of satellite measurements // J. Atmos. Ocean. Technol. 1993. V. 10, N 5. P. 725–735.
91. Ignatov A.M., Stowe L.L., Sakerin S.M., Korotaev G.K. Validation of NOAA/NESDIS satellite aerosol product over the North Atlantic in 1989 // J. Geophys. Res. 1995. V. 100, N D3. P. 5123–5132.
92. Li Liu, Mishchenko M.I., Geogdzhayev I., Smirnov A., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Ershov O.A. Global validation of two-channel AVHRR aerosol optical thickness retrievals over the oceans // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2004. V. 88, N 1–3. P. 97–109.
93. Smirnov A., Holben B.N., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Slutsker I., Chin M., Diehl T.L., Remer L.A., Kahn R., Ignatov A., Mishchenko M., Liu L., Kucsera T.L., Giles D., Eck T.F., Kopelevich O. Ship-based aerosol optical depth measurements in the Atlantic Ocean,

- comparison with satellite retrievals and GOSART model // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33, N L14817. DOI: 10.1029/2006GL026051.
94. Smirnov A., Holben B.N., Slutsker I., Giles D., McClain C.R., Eck T.F., Sakerin S.M., Macke A., Croot P., Zibordi G., Quinn P., Sciare J., Kinne S., Harvey M., Smyth T., Piketh S., Zielinski T., Proshutinsky A., Goes J., Seigel D.A., Larouche P., Radionov V.F., Goloub P., Krishnamoorthy K., Matarrese R., Robertson L., Jourdin F. Maritime Aerosol Network as a component of Aerosol Robotic Network // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. N D06204. DOI: 10.1029/2008JD011257.
 95. Smirnov A., Holben B.N., Giles D.M., Slutsker I., O'Neill N.T., Eck T.F., Macke A., Croot P., Courcoux Y., Sakerin S.M., Smyth T.J., Zielinski T., Zibordi G., Goes J.I., Harvey M., Quinn P.K., Nelson N.B., Radionov V.F., Duarte C.M., Losno R., Sciare J., Voss K., Kinne S., Nalli N.R., Joseph E., Krishna Moorthy K., Covert D., Gulev S.K., Milneevsky G., Larouche P., Belanger S., Horne E., Chin M., Remer L.A., Kahn R.A., Reid J.S., Schulz M., Heald C.L., Zhang J., Lapina K., Kleidman R.G., Griesfeller J., Gaitley B.J., Tan Q., Diehl T.L. Maritime Aerosol Network as a component of AERONET – first results and comparison with global aerosol models and satellite retrievals // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. N 4. P. 583–597.
 96. Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Полюкин В.В., Радионов В.Ф., Holben B.N., Smirnov A. Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике // *Оптика атмосфер. и океана.* 2016. Т. 29, № 8. С. 666–678. DOI: 10.15372/AOO20160808; Sakerin S.M., Kabanov D.M., Polkin V.V., Radionov V.F., Holben B.N., Smirnov A. Variations in aerosol optical and microphysical characteristics along the route of Russian Antarctic expeditions in the East Atlantic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 89–102.
 97. Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Полюкин В.В., Радионов В.Ф. Зональное распределение физико-химических характеристик аэрозоля в Восточной Атлантике // *Оптика атмосфер. и океана.* 2018. Т. 31, № 4. С. 303–312. DOI: 10.15372/AOO20180409; Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Polkin V.V., Radionov V.F. Zonal Distribution of Aerosol Physicochemical Characteristics in the Eastern Atlantic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 5. P. 492–501.
 98. Tomasi C., Kokhanovsky A.A., Lupi A., Ritter C., Smirnov A., Mazzola M., Stone R.S., Lanconelli C., Vitale V., Holben B.N., Nyeki S., Wehrli C., Altonen V., de Leeuw G., Rodriguez E., Herber A.B., Stebel K., Stohl A., O'Neill N.T., Radionov V.F., Zielinski T., Petelski T., Sakerin S.M., Kabanov D.M., Xue Y., Mei L., Istomina L., Wagener R., McArthur B., Sobolevski P.S., Butler J., Kivi R., Courcoux Y., Larouche P., Broccardo S., Piketh S.J. Aerosol remote sensing in polar regions // *Earth-Sci. Rev.* 2015. 140. P. 108–157. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.001> (last access: 2.03.2019).
 99. Чернов Д.Г., Козлов В.С., Панченко М.В., Турчинович Ю.С., Радионов В.Ф., Губин А.В., Прахов А.Н. Особенности изменчивости концентраций аэрозоля и сажи в приземном слое воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в 2011–2013 гг. // *Проблемы Арктики и Антарктики.* 2014. № 4(102). С. 34–44.
 100. Sakerin S.M., Bobrikov A.A., Bukin O.A., Golobokova L.P., Polkin Vas.V., Polkin Vik.V., Shmirko K.A., Kabanov D.M., Khodzher T.V., Onischuk N.A., Pavlov A.N., Potemkin V.L., Radionov V.F. On measurements of aerosol-gas composition of the atmosphere during two expeditions in 2013 along Northern Sea Route // *Atmos. Chem. Phys.* 2015. V. 15, iss. 21. P. 12413–12443. DOI: 10.5194/acp-15-12413-2015.
 101. Полюкин В.В., Полюкин Вас.В., Панченко М.В. Годовой ход микрофизических характеристик аэрозоля на станции Восток в 2009 и 2011 гг. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 11. С. 963–967.
 102. Панченко М.В., Козлов В.С., Полюкин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // *Оптика атмосфер. и океана.* 2012. Т. 25, № 1. С. 46–54.
 103. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Kozlov V.S. An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5, N 7. P. 1513–1527.
 104. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B. Vertical profiles of optical and microphysical characteristics of tropospheric aerosol from aircraft measurements / A. Kokhanovsky (ed.) // *In Light Scattering Rev.* 2015. P. 199–234. DOI: 10.1007/978-3-662-46762-6.
 105. Panchenko M.V., Terpugova S.A., Pol'kin V.V., Kozlov V.S., Chernov D.G. Modeling of aerosol radiation-relevant parameters in the troposphere of Siberia on the basis of empirical data // *Atmosphere.* 2018. V. 9, N 11. P. 414–430. DOI: 10.3390/atmos9110414.
 106. Paris J.-D., Ciais Ph., Nédélec Ph., Stohl A., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Carouge C., Golitsyn G., Granberg I.G. New insights on the chemical composition of the Siberian air shed from the YAK-AEROSIB aircraft campaigns // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91, N 5. P. 625–641.
 107. Kozlov V.S., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Chernov D.G., Yausheva E.P., Pol'kin V.V., Terpugova S.A. Long-Term Investigations of the Spatiotemporal Variability of Black Carbon and Aerosol Concentrations in the Troposphere of West Siberia and Russian Subarctic // *Chem. Sustainable Dev.* 2016. V. 24, N 4. P. 423–440. DOI: 10.15372/KhUR20160401.
 108. Paris J.-D., Stohl A., Nédélec Ph., Arshinov M.Yu., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Law K.S., Belan B.D., Ciais Ph. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 23. P. 9315–9327.
 109. Kozlov V.S., Yausheva E.P., Terpugova S.A., Panchenko M.V., Chernov D.G., Shmargunov V.P. Optical-microphysical properties of smoke haze from Siberian forest fires in summer 2012 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, iss. 15. P. 5722–5741.
 110. Gorchakov G.I., Sitnov S.A., Sviridenkov M.A., Semoutnikova E.G., Emilenko A.S., Isakov A.A., Kopeikin V.M., Karpov A.V., Gorchakova I.A., Verichev K.S., Kurbatov G.A., Ponomareva T.Ya. Satellite and ground-based monitoring of smoke in the atmosphere during the summer wildfires in European Russia in 2010 and Siberia in 2012 // *Int. J. Remote Sens.* 2014. V. 35, N 15. P. 5698–5721.
 111. Виноградова А.А., Васильева А.В. Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 467–475; VINOGRADOVA A.A., VASILEVA A.V. Black Carbon in air over northern regions of Russia: sources and spatiotemporal variations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 6. P. 533–541.

112. *Kononov I.B., Lvova D.A., Beekmann M., Jethva H., Mikhailov E.F., Paris J.-D., Belan B.D., Kozlov V.S., Ciais P., Andreae M.O.* Estimation of black carbon emissions from Siberian fires using satellite observations of absorption and extinction optical depths // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14889–14924. DOI: 10.5194/acp-18-14889-2018.
113. *Панченко М.В., Журавлева Т.Б., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г.* Оценка радиационных эффектов аэрозоля в фоновых и задымленных условиях атмосферы Сибири на основе эмпирических данных // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 2. С. 45–54.
114. *Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Полькин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г.* Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 834–839; *Zhuravleva T.B., Panchenko M.V., Kozlov V.S., Nasrtdinov I.M., Pol'kin V.V., Terpigova S.A., Chernov D.G.* Model estimates of dynamics of the vertical structure of solar absorption and temperature effects under background conditions and in extremely smoke-laden atmosphere according to data of aircraft observations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 25–30.
115. *Gelencser A.* Carbonaceous Aerosol. Dordrecht: Springer, 2004. 350 p.
116. *Воронецкая Н.Г., Певнева Г.С., Головка А.К., Козлов А.С., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н.* Углеродородный состав тропосферного аэрозоля юга Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 6. С. 496–505; *Voronetskaya N.G., Pevneva G.S., Golovko A.K., Kozlov A.S., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N.* Hydrocarbon composition of tropospheric aerosol in the South of Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2014. V. 27, N 4. P. 547–557.
117. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронежская Н.Г., Головка А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н.* Годовая динамика органической составляющей аэрозоля в свободной атмосфере над югом Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2015. Т. 28, № 10. С. 879–882; *Arshinov M.Yu., Belan B.D., Voronetskaya N.G., Golovko A.K., Davydov D.K., Kozlov A.S., Malyshekin S.B., Pevneva G.S., Simonenkov D.V., Tolma-*
- chev G.N.* Annual dynamics of aerosol organic components in the free atmosphere over South-Western Siberia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 1. P. 1–4.
118. *Козлов А.С., Петров А.К., Куйбида Л.В., Малышкин С.Б., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К.* Нуклеационные всплески в атмосфере бореальной зоны Западной Сибири. Часть III. Химическая природа весенних всплесков по данным измерений на территории обсерватории «Фоновая» // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 6. С. 463–466.
119. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронежская Н.Г., Головка А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В.* Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 2. Вертикальное распределение // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 9. С. 733–739.
120. *Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Воронежская Н.Г., Головка А.К., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов А.С., Малышкин С.Б., Певнева Г.С., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики. Ч. 3. Продукты лесных пожаров // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 9. С. 740–749.
121. *Любовцева Ю.С., Канустин В.Н.* О наблюдении природных фотохимических дымок // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана.* 1976. Т. 12, № 6. С. 620–626.
122. *Tröstl J., Wayne W.K., Gordon H., Heinritzi M., Chao Yan, Molteni U., Ahlm L., Frege C., Bianchi F., Wagner R., Simon M., Lehtipalo K., Williamson Ch., Craven J.S., Duplissy J., Adamov A., Almeida J., Bernhammer A.-K., Breitenlechner M., Brilke S., Dias A., Herhart S., Flagan R.C., Franchin A., Fuchs C., Guida R., Gysel M., Hansel A., Hoyle Ch.R., Jokinen T., Junninen H., Kangasluoma J., Keskinen H., Kim J., Krapf M., Kürten A., Laaksonen A., Lawler M., Leiminger M., Mathot S., Möhler O., Nieminen T., Onnela A., Petäjä T., Piel F.M., Miettinen P., Rissanen M.P., Rondo L., Sarnela N., Schobesberger S., Sengupta K., Sipilä M., Smith J.N., Steiner G., Tomé A., Virtanen A., Wagner A.C., Weingartner E., Wimmer D., Winkler P.M., Ye P., Carslaw K.S., Curtius J., Dommen J., Kirkby J., Kulmala M., Riipinen I., Worsnop D.R., Donahue N.M., Baltensperger U.* The role of low-volatility organic compounds in initial particle growth in the atmosphere // *Nature (Gr. Brit.).* 2016. V. 533, N 7604. P. 527–531.

M.V. Panchenko, M.V. Kabanov, Yu.A. Phalagov, B.D. Belan, V.S. Kozlov, S.M. Sakerin, D.M. Kabanov, V.N. Uzhegov, N.N. Shchelkanov, V.V. Polkin, S.A. Terpigova, G.N. Tolmachev, E.P. Yausheva, M.Yu. Arshinov, D.V. Simonenkov, V.P. Shmargunov, D.G. Chernov, Yu.S. Turchinovich, Vas.V. Pol'kin, T.B. Zhuravleva, I.M. Nasrtdinov, P.N. Zenkova. Comprehensive studies of tropospheric aerosol at IAO SB RAS (stages of development).

In the work dedicated to the 50th anniversary of V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, review of experimental studies that have identified important stages in the development of a comprehensive study of aerosol life in the atmosphere is presented in a certain chronology. The main results of a series of expeditionary studies of the optical and microphysical properties of aerosol of marine coastal haze, arid zone, and various geographical regions of the oceans are briefly discussed.

A modern set of methods and equipment that we use to measure aerosol characteristics in the monitoring mode at the network of IAO SB RAS stations is described. The results of long-term studies of tropospheric aerosol using aircraft laboratory are presented.

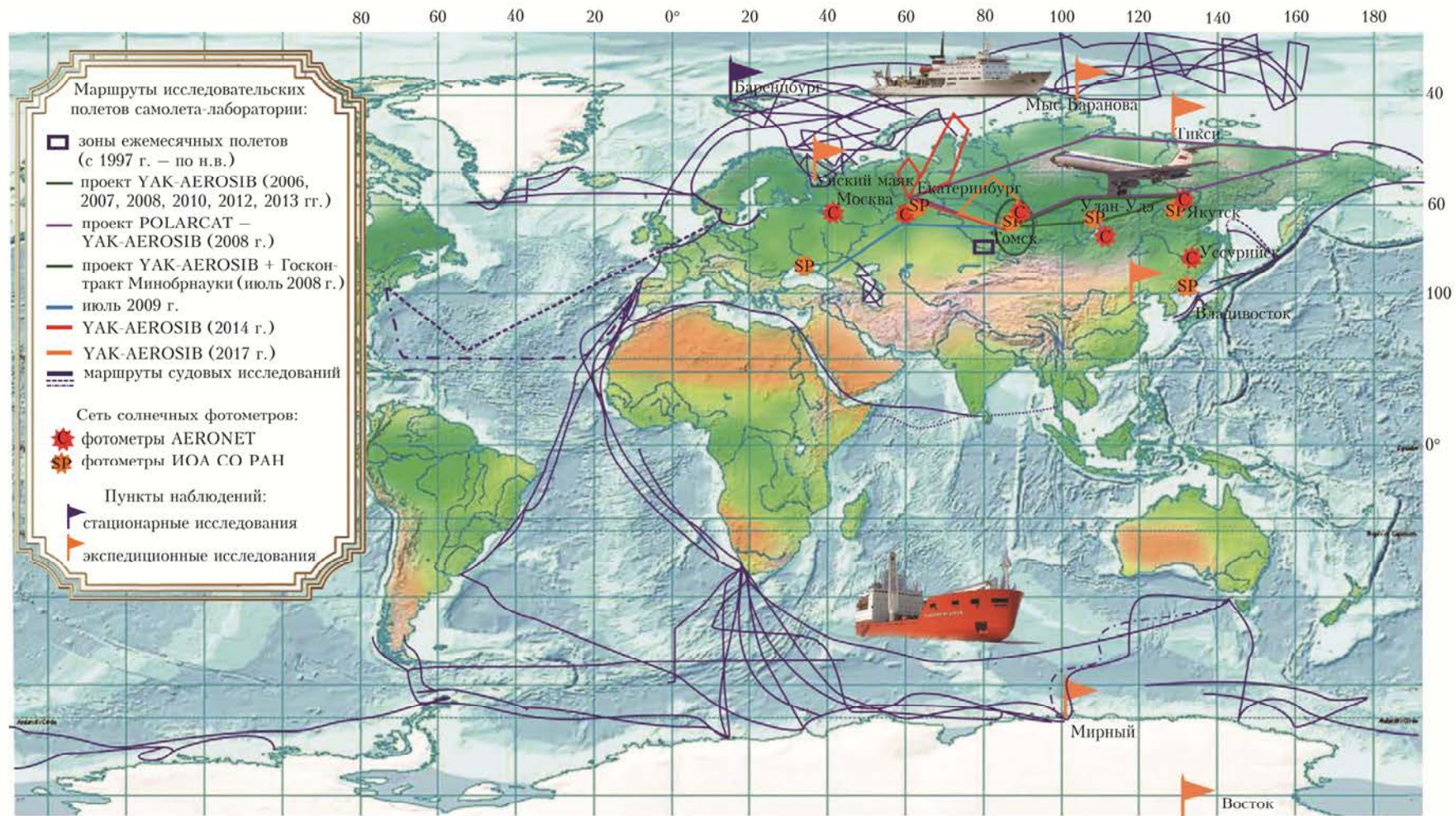


Рис. 1. География аэрозольных исследований ИОА СО РАН