

УДК 551.510.42, 551.510.411, 519.25

ТРУДНЫЕ 1990-е ГОДЫ – ВРЕМЯ КРУПНЫХ ПРОЕКТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СОСТАВА АТМОСФЕРЫ

© 2025 г. Н. Ф. Еланский

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, стр. 1, Москва, 119017 Россия

e-mail: n.f.elansky@mail.ru

Поступила в редакцию 08.10.2024 г.

После доработки 20.10.2024 г.

Принята к публикации 15.11.2024 г.

Обострение в 1990-е гг. проблем изменения состояния озонового слоя и климата Земли вызвали бурное развитие исследований состава атмосферы. Создание более совершенных численных моделей с целью прогнозирования возможных последствий требовало расширения числа измеряемых примесей и более подробной информации о химических взаимодействиях в атмосфере. Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА РАН) – один из немногих научных центров в странах бывшего СССР, который в условиях экономического и политического кризиса следовал общемировой тенденции. В статье кратко изложены основные достижения Института в области совершенствования системы наблюдений состава атмосферы и изучения процессов переноса и химической трансформации примесей в период с 1990 по 2008 гг., когда Г.С. Голицын возглавлял ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Ключевые слова: состав атмосферы, озон, парниковые газы, эмиссии загрязняющих примесей в атмосферу, баланс углерода

DOI: 10.31857/S0002351525010053, **EDN:** HFDFYY

1. ВВЕДЕНИЕ

Институт физики атмосферы (ИФА) АН СССР был образован в 1956 г., накануне проведения масштабного научного эксперимента «Международного геофизического года» (МГГ, 1957–1958 гг.). Одной из побудительных причин организации МГГ стало осознание того факта, что между деятельностью человека и состоянием окружающей среды существует тесная связь. Для воздушной среды узловым элементом этой связи являются газовые и аэрозольные составляющие атмосферы. Участие А.М. Обухова и ведущих ученых Института в подготовке научной программы МГГ и установившиеся контакты с зарубежными учеными-геофизиками положили начало исследованиям состава атмосферы в ИФА АН СССР. Под руководством Г.В. Розенберга, специализировавшегося в области переноса излучения в дисперсных средах, начались исследования оптических свойств и микрофизики аэрозоля. Разрабатывались методы измерений атмосферного аэрозоля как системы фракций,

создавалась аппаратура. На Звенигородской научной станции ИФА АН СССР (ЗНС) были организованы регулярные измерения спектральной прозрачности атмосферы и вертикальной стратификации распределения аэрозоля по данным сумеречного зондирования. В лаборатории верхней атмосферы, возглавляемой профессором В.И. Красовским, начались наблюдения на ЗНС ночного свечения неба, тем самым было создано новое направление в изучении термического режима и состава верхней атмосферы.

В 1962 г. по приглашению А.М. Обухова на работу в Институт поступил создатель одного из лучших в мире ИК-спектрофотометров В.И. Дианов-Клоков. В мастерских ИФА АН СССР была изготовлена небольшая серия таких спектрофотометров, и новая лаборатория атмосферной спектроскопии включилась в исследования парниковых газов. В Москве и на ЗНС в 1970-х гг. начались и продолжаются до настоящего времени регулярные измерения содержания в атмосфере метана, окиси углерода и водяного пара.

В начале 1970-х гг. научное сообщество было взбудоражено открытием П.Й. Крутценом цепных реакций в стратосфере с участием кислорода и окислов азота, ведущих к гибели озона. Особенно угрожающе выглядел сделанный им в статье [Crutzen, 1971] вывод, гласящий, что «искусственное увеличение содержания азота в стратосфере... может привести к заметным изменениям в атмосферном озоне», что означало поступление на поверхность Земли опасной для живых организмов коротковолновой УФ солнечной радиации.

В 1976 г. ИФА АН СССР был назначен головной организацией, ответственной за проведение полномасштабной научно-исследовательской работы (НИР), которая должна была дать ответ на все ключевые вопросы – от возможности частичного или полного разрушения озонового слоя до его последствий для жизни человека. В ИФА была создана лаборатория газовых примесей (ЛГПА) под руководством Н.Ф. Еланского, которая сосредоточилась на изучении фундаментальных и прикладных задач в области физики и химии озона. Сложность стоящих задач потребовала сформировать широкую кооперацию академических институтов, университетов и ведомственных НИИ. Работа большого коллектива продолжалась до 1986 г. В рамках этого проекта сотрудники ЛГПА разрабатывали методы наблюдений, аппаратуру и проводили измерения содержания в атмосфере озона, окислов азота, аэрозоля, других веществ,

оказывающих влияние на радиационный режим и химический состав атмосферы. Средства, выделенные на проведение НИР, частично расходовались на фундаментальные исследования состава атмосферы, проведение летних и морских экспедиций, участие в космических экспериментах, строительство и оборудование Кисловодской высокогорной станции ИФА АН СССР (КВНС), расположенной на Северном Кавказе на высоте 2070 м над уровнем моря (рис. 1).

В 1986 г. НИР была успешно завершена и выдвинута на соискание Государственной премии. Одним из важных результатов НИР стало осознание того факта, что опасное воздействие на озоновый слой может оказать только продолжающаяся неконтролируемая деятельность всего человечества в течение нескольких десятков лет. Неблагоприятные последствия уменьшения озона в стратосфере затронут все, без исключения, страны. К такому же выводу пришли ученые США и других стран. В результате началась разработка конкретных мер по защите стратосферного озона, которые составили основу Монреальского протокола о защите озонового слоя, принятого в сентябре 1987 г.

К концу 1980-х гг. ИФА АН СССР стал ведущим в стране научным центром в области исследований газового и аэрозольного состава атмосферы. В Институте с 1976 по 1990 гг. ежемесячно (кроме двух летних месяцев) проводился межведомственный семинар по атмосферному



Рис. 1. Кисловодская высокогорная научная станция ИФА им. А.М. Обухова РАН

озону, в котором активное участие принимали специалисты из разных городов СССР. Действовали семинары по верхней атмосфере и атмосферному аэрозолю. Развивались отношения с зарубежными научными центрами. Сотрудники созданного Отдела исследований состава атмосферы (ОИСА), включавшего все три упомянутых лаборатории, участвовали в организации всесоюзных и международных научных конференций. Но одновременно в стране разрастался кризис, охвативший все стороны жизни нашего общества. Резкий спад в экономике и глубокий товарный дефицит привели к разрушению системы государственного управления. В июне 1990 г. была принята Декларация о независимости советских социалистических республик, а в декабре 1991 г. Совет Республик Верховного Совета СССР принял Декларацию о прекращении существования Советского Союза.

В это же, полное неопределенности, время ИФА переживал неожиданный уход из жизни (3 декабря 1989 г.) своего директора и научного лидера Александра Михайловича Обухова – выдающегося ученого и талантливого организатора. А.М. Обухов создал Институт физики атмосферы, определил основные направления исследований, из молодых и авторитетных ученых сформировал плодотворно работающий коллектив и эффективно действующую систему научных станций. Институт оказался в критическом положении. Резко снизилось бюджетное финансирование, закончилось финансирование крупных целевых программ, выполняемых по постановлениям правительства, практически полностью прекратилось выделение средств по статьям, связанных с приобретением научного оборудования и поддержкой хозяйственной деятельности на научных станциях.

Одновременно, в связи с необходимостью выполнения требований Монреальского протокола и обострения проблемы изменения климата Земли, резко росла потребность в информации о содержании в атмосфере химически активных и парниковых веществ. В мире началась активная модернизация и расширение системы мониторинга состава атмосферы, бурно развивались научные направления в области химии атмосферы и численного моделирования.

В январе 1990 г. коллектив сотрудников ИФА единогласно избрал директором Института академика АН СССР Георгия Сергеевича Голицы-

на. Надо было срочно решать множество проблем, которые угрожали не столько развитию Института, сколько его существованию. В научном плане, самой сложной задачей являлось сохранение в планах Института самого затратного научного направления – исследований состава атмосферы, которые опираются на результаты наблюдений, выполняемых на научных станциях и в экспедиционных условиях. Обостренное чувство ответственности за Институт, высокая эрудиция и доброжелательный характер позволили Г.С. Голицыну быстро войти в режим последовательного решения проблем, в частности, связанных с проведением наблюдений состава атмосферы, солнечной радиации и метеорологических параметров.

Следуя сложившимся в ИФА приоритетам, Г.С. Голицын уделил много внимания продолжению регулярных, а по некоторым компонентам (озон, NO_2 , УФ-радиация) непрерывных измерений, которые уже в течение многих лет велись в Москве и на научных станциях Института. На заседаниях многочисленных комиссий и комитетов Г.С. Голицын объяснял необходимость для страны иметь точные сведения о критически важных процессах, вызывающих изменения состава глобальной атмосферы и качества воздуха в городах. Для ОИСА явилось большой удачей его личное участие в подготовке проектов по исследованию состава атмосферы, в планировании экспедиций и, главное, в анализе полученных данных. Уже с самого начала регулярных наблюдений малых примесей с борта самолета-лаборатории ИЛ-14, проходивших в рамках НИР, мы сосредоточились на изучении впервые обнаруженных над горами волновых структур в полях концентрации озона. Очевидной причиной образования таких структур в озоне являлось воздействие внутренних гравитационных волн (ВГВ), образующихся при обтекании горных хребтов. Но механизм такого воздействия был неизвестен. Волны в озоне могли иметь как динамическую, так и химическую природу. Основой для изучения механизма воздействия ВГВ на озон для нас были работы Г.С. Голицына [Голицын, 1965; Голицын, Чунчuzов, 1975; Golitsyn et al., 1984], в которых теоретически обосновывались условия образования гравитационных волн и зависимость их параметров от термодинамического состояния атмосферы. Благодаря этим работам и продуктивным дискуссиям с их

автором, в ЛГПА сформировалось научное направление «Исследование условий образования ВГВ и их характеристик по наблюдениям озона», которое явилось темой нескольких диссертаций и основой плодотворного сотрудничества с зарубежными научными организациями.

В 1990–1991 гг. по инициативе и при непосредственном участии Г.С. Голицына были впервые проведены комплексные исследования состояния воздушной среды в Москве. В работу включились все лаборатории ОИСА, владеющие приборами и методами метеорологических наблюдений, измерений содержания примесей, солнечной радиации и других компонентов воздушной среды. Совместная работа подняла общее настроение и дала уникальные результаты. По материалам этой кампании было опубликовано 3 сборника статей под общим названием [Контроль..., 1991–1992], которые впервые дали более или менее полное представление о состоянии воздушного бассейна г. Москвы и действующих на него различных антропогенных факторах. В частности, впервые были совмещены измерения тонкой структуры городского пограничного слоя атмосферы и концентрации загрязняющих примесей, что позволило объяснить причину формирования экстремально высоких уровней загрязнения и выполнить оценки мощности выбросов от источников различного масштаба. Также, на основе полученной уникальной информации впервые были проведены исследования окислительных свойств московского воздуха и описаны фотохимические механизмы образования озона и гидроксила, играющих ключевую роль в формировании состава городской атмосферы.

Успешный опыт объединения усилий нескольких лабораторий Г.С. Голицын планировал распространить и на крупные коллективы, работающие в смежных областях науки, но в разных институтах. По его инициативе был выполнен анализ результатов исследований состава атмосферы, проводившихся в Советском Союзе в последние 20 лет. Обзор был опубликован в журнале *Tellus* [Golitsyn et al., 1992] и привлек внимание многих ученых с мировым именем к нашим работам в данной области. Исследования велись в разных регионах. Измерения CO_2 проводились Институтом экспериментальной метеорологии (ИЭМ) на высокогорной станции Иссык-Куль (1650 м над уровнем моря), на-

чиная с 1980 г. Результаты 10-летних наблюдений показали, что станция отражает фоновое состояние атмосферы в центрально-азиатском регионе. Получены достоверные оценки положительного тренда CO_2 , амплитуд сезонных и годовых вариаций за 10-летний период. Измерения CH_4 и CO , выполненные на ЗНС в течение 15 лет, также убедительно демонстрировали положительный тренд их содержания в атмосфере — около 1% в год. Наблюдения CO , проведенные в других регионах, в том числе в высоких широтах, позволили построить схему пространственно-временной изменчивости CO в глобальном масштабе. Эта схема в течение длительного времени была основой для численного моделирования поведения CO в атмосфере.

Впервые были выявлены и проанализированы самые характерные особенности пространственного распределения и временной изменчивости O_3 и NO_2 по наблюдениям на ЗНС, КВНС и станции Иссык-Куль, а также в Антарктике в 1986–1988 гг. Над Антарктидой в весенние месяцы наблюдалось углубление озоновой аномалии в стратосфере. В приземном воздухе Антарктики концентрация озона оказалась в среднем в два раза ниже, чем на тех же широтах в Арктике, что указывало на сильно различающийся обмен воздушными массами средних и высоких широт.

Длительную историю имели наблюдения O_3 , NO_2 , CH_4 , CO_2 . Приведенные характеристики их пространственной и временной изменчивости в значительной своей части были получены впервые и потому представляли большую ценность. В статье особо отмечено обнаружение хлорфторуглеродов (ХФУ) в вулканических газах. Доля ХФУ вулканического происхождения может достигать 10% от их общего количества в атмосфере Земли [Исидоров и др., 1991]. Наблюдения многих химически активных соединений в атмосфере, например, этана, закиси азота, ХФУ, только начинались, и полученные результаты пока еще были предварительными. Невысокая точность методов их измерений не позволяла объяснить зарегистрированные вариации, но некоторые особенности, например, сезонный ход, выделялись отчетливо.

Под руководством Г.С. Голицына в первой половине 1990-х гг. было проведено несколько кампаний по наблюдениям важнейших химически активных и климатически значимых веществ,

солнечной радиации, стратификации пограничного слоя атмосферы и других ее характеристик в разных регионах. Выполненные в ходе этих кампаний калибровки и сравнения приборов обеспечивали высокое качество данных и возможность изучения сложных процессов, определяющих изменчивость состава атмосферы в региональном и глобальном масштабе.

В статье [Голицын и др., 1996] подводятся итоги многолетних наблюдений на научных станциях ЗНС, КВНС и Иссык-Куль. Эти станции работали и продолжают работать в настоящее время в режиме непрерывных наблюдений в полном соответствии с требованиями Глобальной службы атмосферы ВМО. Обе высокогорные станции КВНС и Иссык-Куль дают информацию о фоновом состоянии атмосферы, а станция ЗНС по условиям наблюдений относится к региональным станциям. Все приборы, работающие на станциях, регулярно проходили калибровки, международные сравнения и имеют международную сертификацию. Поэтому данные наблюдений корректно отражают долговременные изменения основных химически активных и парниковых составляющих атмосферы.

После 1980 г. почти на всех озонметрических станциях в средних и высоких широтах северного полушария отмечалось снижение общего содержания озона (ОСО) в вертикальном столбе атмосферы, которое ускорилось в 1990 г. и достигло минимума в 1993 г. Это снижение было использовано как основание для заключения Монреальского протокола. Однако последующий рост концентрации озона в стратосфере свидетельствовал и о действии продуктов извержения вулкана Пинатубо, что подтверждалось поведением других атмосферных составляющих.

Важные результаты были получены по измерениям приземной концентрации озона на станции КВНС [Голицын и др., 1996]. Здесь отмечен значимый отрицательный тренд концентрации за период с середины 1980-х по 1995 гг., в то время как на равнинных и горных станциях в Западной Европе тренд был положительным. Увеличение концентрации озона в приземном воздухе Европы уже рассматривалось как повод для заключения конвенции о защите тропосферного озона и принятия ограничительных мер на производство и выбросы многих органических соединений. Очевидно, что эти ограни-

чения ударили бы, прежде всего, по промышленности России. Полученные на КВНС данные убедительно продемонстрировали существование долговременных региональных особенностей в распределении озона, формирующихся под влиянием крупномасштабной атмосферной циркуляции. Последовавшие сравнения результатов наших наблюдений с наблюдениями на Альпийских станциях и наши выступления на международных форумах убедили иностранных коллег в правильности нашей точки зрения, и кампания по подготовке новой конвенции быстро затухла [Senik et al., 2001].

Наблюдения двуокиси азота имеют особую ценность, поскольку NO_2 является ключевым звеном в солнечно-земных связях, и ее изменчивость характеризует химическую активность азотного цикла разрушения озона в стратосфере. Станции КВНС и Иссык-Куль в 1979 и 1981 гг., соответственно, первыми в мире начали регулярные наблюдения NO_2 по прямому солнечному излучению, что сделало данные измерений нечувствительными к изменениям содержания аэрозоля в атмосфере, в частности, после вулканических извержений Эль-Чичон и Пинатубо. На ЗНС измерения NO_2 велись с 1990 г. по рассеянному в зените солнечному излучению. Сопоставление двух подходов позволило получить достоверные тренды изменения NO_2 в беспокойный период, в течение которого произошло два мощных вулканических извержения, нарушивших равновесное состояние атмосферы [Голицын и др., 1996]. В сочетании с данными экспедиционных наблюдений NO_2 в Антарктиде, северных широтах, на научно-исследовательских судах, были впервые выявлены и проанализированы многие особенности глобального распределения и временных вариаций NO_2 , тесно связанных с атмосферной циркуляцией и ее колебаниями [Savinykh et al., 2021].

Пионерские наблюдения NO_2 во время полного солнечного затмения в 1981 и 1992 гг. [Еланский, Арабов, 1982; Голицын и др., 1996] показали высокую чувствительность двуокиси азота к изменениям интенсивности солнечного излучения. Падение содержания NO_2 во время полных затмений составило 40%, что впоследствии было подтверждено наблюдениями 2002 г. (рис. 2) и недавними наблюдениями зарубежных ученых. Этот результат уточнил параметры азотного цикла в атмосфере и использовался



Рис. 2. Участники экспедиции 2002 г. по исследованию воздействия полного солнечного затмения на состав и состояние атмосферы на КВНС (фото И.А. Сенник)

при построении химико-транспортных моделей атмосферы.

В статье [Голицын и др., 1996] приводятся результаты многолетних наблюдений парниковых газов CH_4 , CO_2 и H_2O , которые имеют особое значение для климатических исследований. В отличие от зарубежных наблюдений, на наших станциях измерялось их общее содержание в столбе. Такие значения репрезентативнее для оценки глобальных изменений содержания парниковых газов в атмосфере Земли. В числе главных результатов отмечены изменения величины трендов, связанные с целым рядом причин, как динамических, так и фотохимических. Но в целом, тренды CH_4 , CO_2 и H_2O имеют положительную направленность и близки к тем оценкам, которые получены по наблюдениям их концентраций на базовых станциях сети GAW.

Такие преимущества имеют и наблюдения общего содержания окиси углерода на ЗНС. К 1996 г. здесь был получен самый длительный ряд данных о содержании CO [Голицын и др., 1996]. Измерения начались в 1970 г. Этот газ в значительной степени является продуктом человеческой деятельности и характеризует за-

грязнение атмосферы. В целом, содержание CO росло, но, как и в случае с парниковыми газами, выделяются участки с разной скоростью роста, которые вызваны изменениями активности антропогенных источников и фотохимических взаимодействий. В среднем, в течение 25 лет содержание CO возрастало со скоростью 0.7% в год. Для летне-осеннего периода скорость роста составила 1%, для зимне-весеннего 0.7% в год, причем в интервале с 1985 по 1993 г. тренд был отрицательным – 0.2% в год, что связано с уменьшением озона и повышением уровня УФ радиации и, соответственно, увеличением химического стока CO из атмосферы.

Выполненная под руководством Г.С. Голицына работа, объединившая труд нескольких коллективов, показала достоинства такой кооперативной деятельности. Многие результаты и выводы были получены только благодаря объединению данных наблюдений и творческих возможностей участников проекта.

2. РОССИЙСКО-АМЕРИКАНСКИЕ ПРОЕКТЫ

Плодотворное участие Г.С. Голицына в организации и проведении комплексных наблю-

дений состава атмосферы и анализе полученных данных, результаты которого закрывают многие ниши в объяснении происходящих в атмосфере изменений, способствовали расширению контактов с зарубежными коллегами и приглашению сотрудников ИФА к участию в международных проектах. В 1990 г. ИФА стал участником крупного российско-американского соглашения (его подготовка началась в 1989 г.) по созданию системы мониторинга озонового слоя с помощью американского прибора TOMS на борту российского спутника Метеор-3 (эксперимент Метеор-3/TOMS). В рамках данного соглашения Н.Ф. Еланский участвовал в модернизации системы регистрации и обработки данных. Успешно прошедший 15 августа 1991 г. запуск аппарата, устойчивая работа на орбите и качественные данные о содержании озона подвигли руководящие органы двух стран принять соглашение о проведении второго совместного проекта по наблюдениям вертикальной структуры озонового слоя путем установки системы наблюдения SAGE-3 на борту спутника Метеор-3. В работе по организации этого эксперимента активно участвовали Г.С. Голицын и Н.П. Лаверов, представлявшие РАН в российско-американской комиссии по космическим исследованиям. Н.Ф. Еланский вошел в состав международной рабочей группы по валидации данных, а О.В. Постыляков – в состав группы разработчиков программного обеспечения. Запуск спутника состоялся 10 декабря 2001 г., и система мониторинга Метеор-3/SAGE-3 функционировала несколько лет. Данные наблюдений общего содержания озона и его вертикального распределения непрерывно выкладывались в Мировом центре данных для общего доступа. На этих данных базировались многочисленные исследования, проводившиеся в США, России (в том числе в ИФА РАН), и во многих других странах. За успешно выполненную работу участники проектов были отмечены Дипломами NASA.

3. ТРАНСКОНТИНЕНТАЛЬНЫЕ ЭКСПЕДИЦИИ TROICA

Идея провести наблюдения концентрации озона на пассажирском поезде, пересекающем всю территорию России от Москвы до Владивостока, родилась в феврале 1995 г. в дружеском разговоре Г.С. Голицына и П.Й. Крутцена, ког-

да в перерыве Международной конференции по климату они сидели в маленьком греческом ресторане. Г.С. Голицын рассказывал о работах ИФА, наблюдениях озона и аэрозоля и упомянул, как необычным образом он принял участие в международных сравнениях приборов для наблюдения двуокси азота, которые проходили год назад на Звенигородской научной станции. На своей даче в Луцино, расположенной недалеко от ЗНС, они с супругой приютили участников сравнений – молодого человека и девушку – сотрудников Института метеорологии, астрономии и геофизики Университета г. Граца (Австрия). Сравнения приборов с участием новозеландцев, немцев, австрийцев и нескольких коллективов из российских институтов продолжались десять дней. К концу этой кампании Г.С. Голицын и сам почувствовал себя участником сравнений, поскольку включился в обсуждение результатов наблюдений, и, следовал принятому режиму, вставал до восхода и ложился спать глубоко после захода Солнца. П.Й. Крутцен, открывший и описавший азотный каталитический цикл разрушения озона, заметил, что также старается направлять студентов и аспирантов проводить измерения озона и окислов азота во время каникул, совершая походы в горы и по рекам. Такие наблюдения могут дать ценную информацию о тех регионах, где отсутствуют наблюдательные станции, а в формировании климата роль этих территорий очень велика, например, Сибири с ее бореальными лесами, тундрами и вечной мерзлотой. Г.С. Голицын сказал, что сотрудники ИФА РАН несколько лет вели измерения озона и NO_2 на борту самолета-лаборатории практически над всей территорией страны и, в том числе, над Сибирью, но в последние годы полеты прекратились из-за отсутствия финансирования. П.Й. Крутцен посочувствовал: «мол, конечно, полеты обходятся дорого, но можно было бы попросить какого-нибудь сотрудника, который едет в командировку, померить озон в поезде». Г.С. Голицын пообещал поговорить с руководителем лаборатории Н.Ф. Еланским, который наверняка сможет организовать такие измерения озона на пассажирском поезде Москва–Владивосток. В ответ П. Крутцен с энтузиазмом пообещал оплатить железнодорожный билет на поездку от Москвы до Владивостока даже из личных средств.

Чтобы измерения представляли научный интерес, необходимо было использовать сертифицированный газоанализатор, чувствительность которого была бы достаточной для измерения малых вариаций концентрации озона в чистых фоновых условиях. Для проведения измерений в купе пассажирского поезда следовало внести изменения в стандартную компоновку пассажирского вагона — установить систему забора воздуха и обеспечить круглосуточную подачу электроэнергии напряжением 220 В. Но любые изменения требовали согласования с конструкторским бюро и Министерством путей сообщения РФ. В то же время измерения озона малоэффективны без одновременных наблюдений метеопараметров, солнечной радиации, окислов азота, так как без дополнительной информации объяснить регистрируемые изменения будет невозможно. Поэтому имело смысл проводить измерения в отдельном специализированном или в почтовом вагоне. Сотрудники ЛГПА к тому времени имели богатый опыт в проведении комплексных наблюдений. К нашему измерительному комплексу, который использовался в полетах на самолете-лаборатории Як-40, мы предполагали добавить приборы, подготовленные в рамках российско-канадского проекта для наблюдений O_3 и NO_2 на пассажирском самолете ИЛ-62, совершающем регулярные рейсы между Москвой и Монреалем. Устройства для забора воздуха и дистанционных наблюдений были разработаны еще в 1990 г. совместно с КБ им. А.Н. Туполева при переоборудовании ТУ-144 в летающую лабораторию.

Георгий Сергеевич Голицын одобрил такой комплексный подход к наблюдениям и подписал соответствующее письмо на имя министра Н.Е. Аксененко. Встречи с руководством нескольких департаментов Министерства путей сообщения РФ не приносили результата пока не произошла случайная встреча в лифте с заведующим сектором ВНИИ железнодорожного транспорта А.М. Грисенко, которая оказалась судьбоносной для будущего проекта TROICA — TRanscontinental Observations Into Chemistry of the Atmosphere. А.М. Грисенко воспринял наш проект как чрезвычайно важный для науки и очень полезный для железнодорожного транспорта. Наша с ним увлеченность проектом передалась ведущему специалисту МПС В.В. Севостьянову, членам Научного совета

ВНИИЖТ и его директору А.Л. Лисицыну. ИФА РАН для поездки по Транссибу был обещан вагон-лаборатория.

В июне 1995 г. во время посещения Института химии Макса Планка (Майнц, Германия) Н.Ф. Еланский подробно изложил научную программу экспедиции П.Й. Крутцену. В результате было заключено соглашение о научном сотрудничестве между ИХМП и ИФА РАН. В соответствии с соглашением ИХМП обеспечивал финансирование экспедиции.

20 ноября 1995 г. экспедиция отправилась в путь на стареньком, отапливаемом углем вагоне-лаборатории, во главе скорого поезда Москва-Хабаровск [Elansky et al, 2009]. Она не решала больших научных задач, а должна была подтвердить возможность получения точных данных о составе и состоянии атмосферы по наблюдениям на вагоне-лаборатории, который располагался непосредственно за электровозом и передвигался по электрифицированному железнодорожному пути. Первая тестовая экспедиция успешно выполнила поставленную задачу — в самых сложных погодных условиях (температура в Сибири местами понижалась до $-35^{\circ}C$) были получены уникальные по качеству и научной ценности данные о содержании в атмосфере O_3 , NO , NO_2 , потоках солнечной радиации и метеопараметрах на всем маршруте Москва-Хабаровск-Москва. Таким образом, было доказано, что использование мобильной железнодорожной платформы открывает широкие перспективы в исследованиях атмосферы над Северной Евразией [Крутцен и др., 1996].

Последующие экспедиции, финансируемые из разных, в основном зарубежных, источников, проводились уже в комфортабельном вагоне-лаборатории ВНИИЖТ, а с 2004 по 2010 гг. — в новой лаборатории, специально построенной МПС РФ с участием ИФА РАН (рис. 3). Лаборатория, оборудованная для комплексных научных исследований, состояла из двух вагонов и автомобиля для объектовых физических и химических исследований.

Всего с 1995 по 2010 гг. прошло 15 экспедиций TROICA с участием ученых из ведущих российских и зарубежных научных центров. Большая часть наблюдений была выполнена вдоль Транссиба. Также были сделаны меридиональные разрезы между Мурманском и Сочи



Рис. 3. Передвижная лаборатория TROIKA

или Кисловодском, а также и тройной объезд московского мегаполиса по областной кольцевой железной дороге [Elansky et al., 2009; Еланский и др., 2021].

Обработка и осмысление огромного объема данных, получаемых в каждой экспедиции, представляли большую трудность. Проблема с обработкой довольно быстро была решена путем автоматизации системы сбора данных, проверки их качества и архивации [Голицын и др., 2000]. Большое значение при этом имел электронный дневник экспедиции, который велся дежурными операторами непрерывно в течение всего маршрута. В дневнике отражались все особенности местности, погодные условия, практически все встреченные на пути сколь-нибудь значимые объекты железнодорожной и городской инфраструктуры. Большой вклад в понимание и интерпретацию результатов наблюдений внес Г.С. Голицын. С его участием был выявлен и изучен целый ряд характерных особенностей состава атмосферы над континентом.

В первых трех экспедициях были отработаны методы измерений наиболее важных составляющих воздуха в пограничном слое атмосферы. В статье [Crutzen et al. 1998], посвященной оценке достоверности данных наблюдений и анализу первых результатов, подтверждается большой потенциал использования железнодорожного транспорта для исследования состава атмосфе-

ры. Впервые предоставлены данные о суточных изменениях приземного озона над континентом и их зависимости от скорости фотодиссоциации NO_2 [Golitsyn et al., 2002]. В удаленных районах Сибири отмечен интенсивный ночной сток озона на подстилающей поверхности. Высокие, на уровне 1.95 ppb, концентрации CH_4 характерны для всей Западной Сибири, от Урала до Енисея. Предположительно, они вызваны эмиссиями с увлажненной равнинной территории. В Восточной Сибири концентрация CH_4 низкая, не превышающая 1.85 ppb [Elansky et al., 2000; Oberlander et al., 2002]. Противоположный характер распределения наблюдался у CO . В Западной Сибири отмечены минимальные значения, около 110 ppb, а на востоке – максимальные. К востоку от Читы, в долине Амура, на протяжении 2000 км концентрация CO достигала местами 1000 ppb, что указывало на существование довольно устойчивого потока загрязненного воздуха из Китая. Изотопный анализ ^{14}C в образцах воздуха из этого района подтвердил, что увеличение CO связано со сжиганием биомассы [Bergamaschi et al., 1998]. Впервые были получены сведения о распределении SF_6 – парникового газа антропогенного происхождения. Его концентрация понижается в восточном направлении с 4.0 до 3.9 ppt [Hurst et al., 2004].

В рамках проекта TROIKA в ЛГПА при поддержке Г.С. Голицына начались работы в области



Рис. 4. Г.С. Голицын и вице-президент РАН Г.А. Месяц (в центре) открывают презентацию лаборатории TROICA на Всемирной конференции по изменению климата, октябрь 2003 г.



Рис. 5. Участники проекта TROICA на демонстрации передвижной лаборатории на климатическом форуме 2003 г. на Павелецком вокзале г. Москвы (крайний справа А.М. Грисенко)

химии атмосферы (рис. 4, 5). Основу их составляли данные наблюдений летучих органических соединений (ЛОС), определяющих окислительные свойства атмосферы и, в частности, образование озона и гидроксила. В экспедиции TROICA выполняли отбор проб воздуха в сорбционные трубки с разными сорбентами для легких и тяжелых ЛОС [Еланский и др., 2000]. Анализ проводили на хроматографах; для каждого вещества использовали абсолютные калибровочные коэффициенты. Количество проб в экспедициях менялось от 40 до 60, число определяемых химических соединений в пробах – от 35 до 55.

Огромный объем данных о ЛОС систематизировали по территориальному признаку, по погодным условиям, по городским и сельским районам наблюдений, по сезонам и времени суток [Elansky et al., 2001]. В результате были установлены характерные для территории, по которой проходит Транссиб, и для трансектов Мурманск-Сочи и Мурманск-Кисловодск, особенности распределения и временной изменчивости почти всех основных химически активных веществ, необходимых для описания химических взаимодействий в численных химико-транспортных и климатических моделях.

Практически все результаты измерений и анализа данных получены впервые. Определены долготные и широтные градиенты разных представителей легких (C_2 – C_3) и тяжелых (C_5 – C_8) углеводородов [Elansky et al., 2001]. Выявлены районы с повышенными эмиссиями ЛОС разного состава, к которым относятся места добычи и

переработки нефти и газа. Принципиально важным результатом явилось объяснение появления опасных для человека концентраций озона (до 166 ppb), что примерно в четыре раза превышает разовую ПДК в городах Хабаровского края. Активная генерация озона здесь связана с приходом в летний муссонный период насыщенной ЛОС воздушной массы из Японии, которая быстро доокисляется под действием городских выбросов окислов азота [Еланский и др., 2000; Еланский и др., 2005; Elansky et al., 2009].

Непрерывные измерения (с шагом от 10 с до 1 мин) большого числа примесей в приземном воздухе и общего содержания O_3 и NO_2 в вертикальном столбе сделали возможным исследовать воздействие локальных объектов на состояние окружающей их среды. К таким объектам относятся встречные грузовые поезда, тоннели, лесные пожары, промышленные предприятия и т.д. Особое внимание Г.С. Голицын уделял изучению воздействия высоковольтных линий электропередач (ЛЭП). Уже в первых экспедициях было замечено небольшое возрастание концентрации озона при пересечении ЛЭП напряжением 220 и 500 кВ [Голицын и др., 2002]. Используя программу автоматической обработки данных и экспедиционный дневник, где фиксировались все ЛЭП, метеорологические условия, скорость движения, состояние пограничного слоя и окружающей местности, были собраны и систематизированы около 1200 профилей O_3 при пересечении ЛЭП. Большой объем данных позволил получить значимые сред-

ние значения увеличения озона равные 2.1 ± 0.5 и 2.9 ± 0.6 ppb для ЛЭП 220 и ЛЭП 500 кВ, соответственно (рис. 6). Эффект воздействия ЛЭП на содержание озона был подтвержден в экспериментах с автомобильной лабораторией. Подробно результаты исследований изложены в работах [Еланский и др., 1999, 2001; Голицын и др., 2005]. Эти результаты, доложенные Г.С. Голицыным на конференции в Германии, оказались неожиданными для научного сообщества, так как обычно рассматривалось только электромагнитное воздействие ЛЭП на экологию окружающей территории. Обнаруженный эффект вызвал большой интерес к изучению химических процессов в зоне коронного разряда и возможного влияния повышенного уровня озона на биологические объекты.

Возможно, еще большее значение для нашего государства имеют исследования эмиссий в атмосферу озоноразрушающих веществ (ОРВ: фреоны-11, -12, -113, галлон-1211, растворители CCl_4 , CH_2Cl_2 и некоторые другие соединения), производство которых было запрещено Монреальским протоколом в 1987 г. Поводом к включению в программу наблюдений экспедиций TROICA широкого спектра этих веществ послужило быстрое расширение кампании по обвинению России в продолжении производства ОРВ. Обвинения были основаны на ис-

следованиях группы Дж. Элкинса (Лаборатории глобального мониторинга, Национальная ассоциация по атмосфере и океану, NOAA, США), которая обнаружила увеличение ОРВ в атмосфере во второй половине 1990-х годов. Поскольку наши наблюдения не зафиксировали высоких концентраций хлорбромуглеродов антропогенного происхождения вдоль Транссиба, мы пригласили группу Дж. Элкинса принять участие в экспедиции. Знакомство с коллективом и директором ИФА РАН, совместная подготовка к экспедиции и дружная работа в экспедиции 2001 г. сняла у наших коллег предубеждение об утаивании важной информации о производстве ОРВ. Результаты наблюдений, выполненных группой Дж. Элкинса и сотрудниками ЛГПА, детально обсуждались в Москве и в Майнце. Только благодаря Г.С. Голицыну и П. Крутцену, Дж. Элкинсу удалось освободиться от давления части руководства NOAA и средств массовой информации и опубликовать совместную статью, опровергающую влияние России на увеличение содержания ОРВ в атмосфере. За качественно выполненные наблюдения и подробный анализ результатов статья [Hurst et al., 2004] была признана редакционным советом ведущего в мире журнала *Journal of Geophysical Research* лучшей из всех статей, опубликованных в 2004 г.

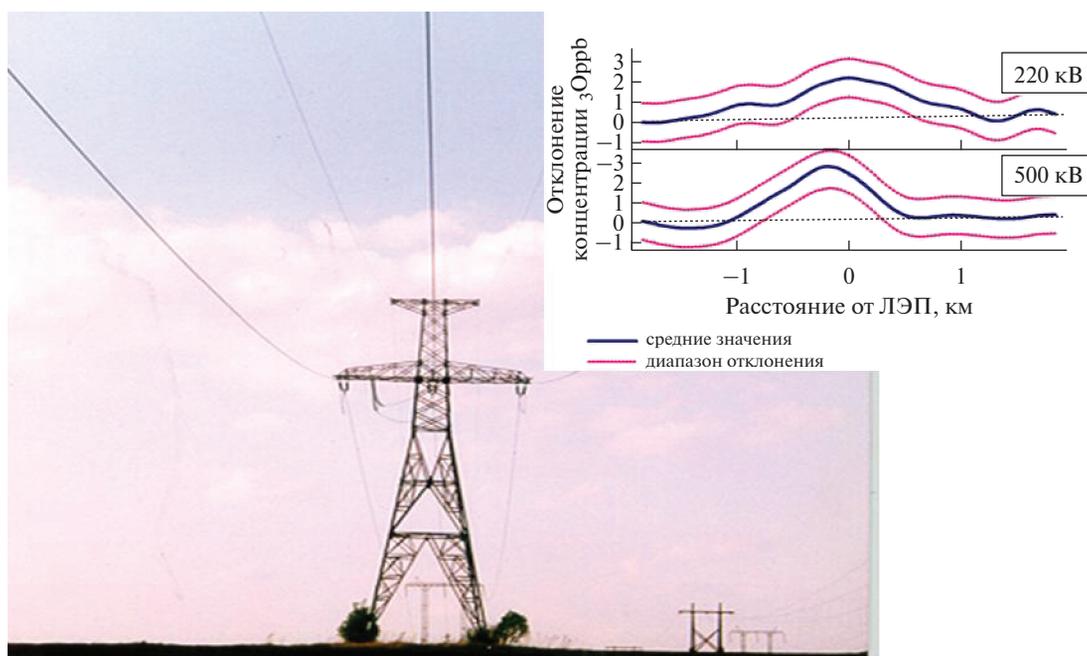


Рис. 6. Изменение концентрации озона при пересечении линий электропередач

Другой неординарный результат связан с переоценкой эмиссий метана в атмосферу на территории России. Повышенный уровень концентрации метана на севере Европейской территории России и в Западной Сибири первоначально связывался с утечками природного газа при его добыче, обработке и транспортировке. Полученные на этой основе интегральные оценки эмиссий метана в Российской Федерации дали значения 25–35 Мгт/год [Reshetnikov et al., 2000.; Dedikov et al., 1999]. Эти значения эмиссий впоследствии учитывались при инвентаризации антропогенных источников и широко использовались в численных моделях атмосферы. Изотопный анализ $^{14}\text{C}\text{H}_4$, проводившийся на передвижной лаборатории и на борту специально оборудованного судна, проходившего по Оби, показал, что большая часть метана в приземной атмосфере Западной Сибири имеет биогенное происхождение. Доля антропогенного метана составляет всего 2% на юге и востоке Западной Сибири и 30–50% в центре основной области добычи природного газа. Рассчитанные выбросы метана в атмосферу в России составили всего 8–10 Мгт/год, что сопоставимо с утечками природного газа в США и на Ближнем Востоке [Tarasova et al., 2006; Elansky et al., 2009; Elansky et al., 2016; Еланский и др., 2021]. Выполненные по результатам экспедиций TROICA переоценки объема эмиссий метана на территории страны получили широкое признание и сняли с Газпрома обвинения в использовании устаревших технологий в газовой индустрии.

Интересные результаты первых двух экспедиций TROICA, а также опыт многолетних измерений содержания малых примесей в атмосфере на высокогорной станции и на подвижных платформах, приобретенный нашей лабораторией, привлекли внимание выдающихся ученых: М. Хейманна – заслуженного профессора Института биогеохимии Макса Планка (ИБМП) и Е.А. Ваганова – академика РАН, директора Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. В конце 1997 г. на встрече в ИБМП в Йене с участием Н.Ф. Еланского состоялось детальное обсуждение проекта по созданию в центре Сибири высотной биоклиматической обсерватории для изучения взаимодействия атмосферы и континентальных экосистем и баланса парниковых газов в Сибири. Необходимо было решить множество технических проблем, связанных с

конструкцией 300-метровой мачты, установкой приборов, отбором проб воздуха, проведением калибровок, энергообеспечением и т.д. и т.п. Результатом обсуждения явилось включение ИФА РАН в число участников проекта. Нашей основной научной задачей была идентификация источников парниковых газов CH_4 и CO_2 с использованием данных измерений химически активных соединений O_3 , ЛОС, а также общего содержания O_3 и NO_2 в пограничном слое атмосферы. Работа над очень сложным в техническом плане проектом с участием ИФА РАН продолжалась несколько лет. Решение Правительства РФ о строительстве российско-германской станции в критически важном для изучения изменения климата регионе долго согласовывалось, пока проект не поступил на экспертизу в ИФА РАН. Экспертиза, подписанная Н.Ф. Еланским и утвержденная Г.С. Голицыным, подтверждала, что проект выгоден России, а участие в нем ИФА РАН обеспечивает чисто научную его направленность. Проект был одобрен, и в 2003 г. в Зотино, в 450 км от Красноярска, началось строительство обсерватории. Торжественное открытие состоялось в июне 2007 г. Наблюдения начались даже раньше в 2006 г. и без перерыва продолжают по настоящее время. В наблюдениях все эти годы использовались лучшие приборы с выполнением всех международных требований и рекомендаций. ИФА РАН точно следует научной программе, а заявленные цели, связанные с исследованиями баланса CH_4 , CO_2 и O_3 , переноса парниковых и загрязняющих веществ и других задач, постепенно реализуются [Heimann et al., 2014].

Фоновый характер обсерватории позволяет проводить количественные оценки вклада дальнего переноса в региональный баланс климатически значимых газовых примесей и аэрозолей. Так, численные расчеты показали [Штабкин и др., 2016], что шлейф загрязнений от источников, расположенных в Западной Европе, на европейской территории России и юге Сибири, в зимний период играет важную роль в региональном балансе СО в фоновых условиях, что позволяет объяснить 55–80% (70–90 ppb) амплитуды наблюдаемого в Зотино годового хода СО. В теплый период влияние антропогенного фактора выражено слабее, и фоновый уровень СО в регионе зависит, в первую очередь, от окисления биогенных летучих органических соединений и пожарной активности.

По наблюдениям приземных концентраций озона и окислов азота получены оценки скорости фотохимической генерации озона и эффективности производства озона в расчете на одну молекулу NO или NO_2 в условиях развитого конвективного пограничного слоя в зоне бореальных лесов. Показано, что режим озона в бореальных лесах Сибири определяется состоянием фотохимической системы O_3 – NO_x –ЛОС. В чистых фоновых условиях, когда содержание NO_x антропогенного происхождения минимально, окислительный потенциал атмосферы невелик, и сток озона преобладает над его образованием [Моисеенко и др., 2019; Моисеенко и др., 2023]. В целом для лесной зоны Сибири является характерным преобладание в атмосферном пограничном слое стока озона над его локальными фотохимическими источниками [Engvall-Stjernberg et al., 2012].

Большое внимание российские участники проекта уделяли наблюдениям и численному моделированию процессов переноса метана в Сибири с использованием глобальной химико-транспортной модели GEOS-chem [Скорород и др., 2016; Моисеенко и др., 2018]. Из полученных результатов можно выделить рассчитанный вклад антропогенных российских источников в содержание метана в Зотино (38.6 ppb), который более чем в два раза превышает вклад источников, расположенных

в Западной Европе (17.7 ppb). Для арктических станций Териберка и Тикси влияние российских и европейских источников сопоставимо (19.5 и 12.4 ppb соответственно). Сравнительно низкий по сравнению с Зотино вклад континентальных эмиссий в приземное содержание CH_4 и его годовую изменчивость на арктических станциях обусловлен длительным временем адвекции из регионов-источников.

Успешное начало трансконтинентальных наблюдений способствовало установлению добрых отношений с Центром экологических исследований (Лейпциг, Германия) и персонально с известным ученым-химиком Л. Вайсфлогом. Совместный проект по изучению влияния хлорорганических соединений на состав атмосферы и состояние растительности (ЕССА) был поддержан европейским фондом научных исследований. Работы велись на обширной территории России в 1997–1999 гг., в том числе на научных станциях ИФА РАН (рис. 7). Многие советы и предложения, сделанные Г.С. Голицыным, были учтены в работе. Благодаря открытию и описанию механизма образования токсичных хлорорганических соединений (пестицидов) в естественных условиях (рис. 8), исследования роли галогенсодержащих веществ в процессах, приводящих к опустыниванию южных территорий России, были продолжены в 1999–2002 гг. в рамках нового проекта TRIDES.



Рис. 7. Участники международного проекта TRIDES на полевых работах в селе Годжур, Калмыкия (июль, 2000 г.). Руководитель проекта – Л. Вайсфлог, Германия (стоит, первый слева)

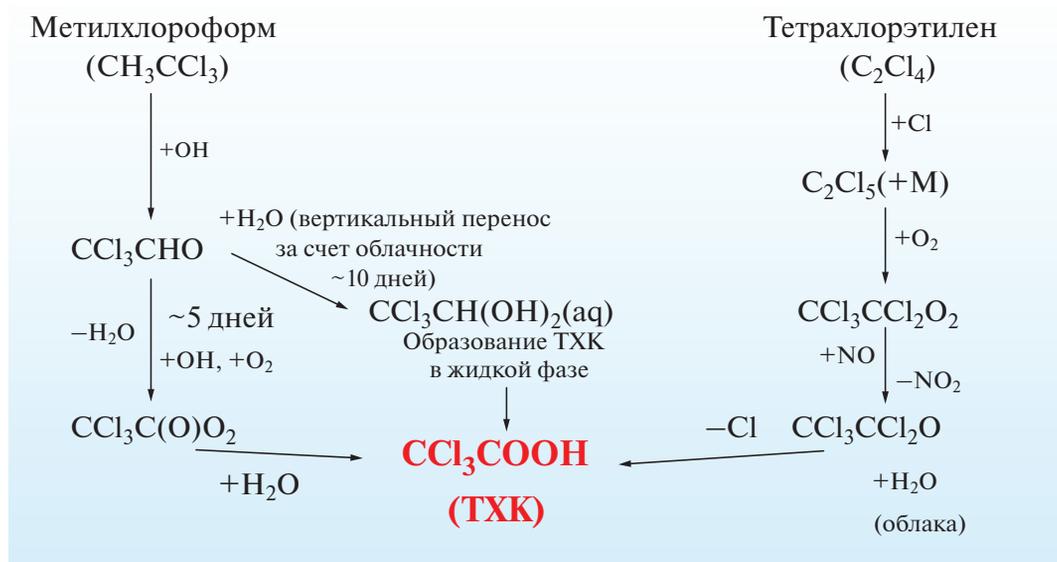


Рис. 8. Схема образования трихлоруксусной кислоты (пестицида) в газовой и водной фазах в естественных условиях

Выполненные в рамках этих проектов исследования выявили механизмы взаимодействия атмосферы, наземных и водных экосистем в засушливых регионах России и мира [Weissflog et al., 2004].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В короткой статье представлены лишь самые резонансные результаты исследований газового состава атмосферы, которые были получены в совместной работе с Г.С. Голицыным в тот сложный период, когда все подразделения Института, особенно, ведущие непрерывные наблюдения, крайне нуждались в его внимании как выдающегося ученого и радетельного директора Института. Конечно, наше сотрудничество дало значимые результаты и в других актуальных направлениях исследований, в том числе и после 2008 г.

Экспедиции TROICA закончились в 2010 г., но работа с данными наблюдений продолжается и в настоящее время. Получены оценки эмиссий CO , CO_2 , CH_4 , изопрена и терпенов из почвы и от растительности, определены эмиссии загрязняющих веществ и параметры острова тепла в крупных городах России, выявлены и описаны различные механизмы воздействия железнодорожного транспорта на качество приземного воздуха и многие другие значимые результаты [Голицын и др., 2004; Еланский и др.,

2010; Elansky et al., 2016]. Проект TROICA получил широкую известность в мире. Попытки повторения подобных трансконтинентальных наблюдений были предприняты в Северной Америке и Австралии, но они завершились неудачей из-за того, что на железных дорогах используются дизельные локомотивы.

Проект TROICA состоялся благодаря тесному сотрудничеству с Институтом Химии Макса Планка и личного участия в нем Нобелевского лауреата П. Крутцена. В 1999 г. П. Крутцен был избран иностранным членом РАН и в 2019 г. одновременно с Г.С. Голицыным был награжден Большой золотой медалью имени М.В. Ломоносова.

Большое значение имело участие Г.С. Голицына в организации и проведении исследований загрязнения атмосферы в московском мегаполисе и в группе городов – Кавказские Минеральные Воды. По инициативе ИФА РАН и поручению мэра г. Москвы Ю.М. Лужкова был создан Экспертный совет с целью модернизации системы мониторинга городской воздушной среды. Сопредседателями совета являлись Г.С. Голицын и министр – руководитель Департамента природопользования Л.А. Бочин, а секретарем – Н.Ф. Еланский. Работа совета была недолгой, но положила начало многолетней крайне полезной совместной деятельности ИФА РАН и Мосэкомониторинга. Такое же плодотворное сотрудничество установилось с руко-

водством г. Кисловодска и пятигорским Институтом курортологии [Голицын и др., 2003].

Георгий Сергеевич Голицын стоял у истоков продолжающегося уже три десятилетия взаимовыгодного сотрудничества с Институтом физики атмосферы Академии наук Китая. Он является руководителем Российско-Китайской лаборатории, основная задача которой состоит в изучении состояния пограничного слоя атмосферы и антропогенного воздействия на атмосферу крупных городов.

Деятельность академика Г.С. Голицына в области исследований газового состава атмосферы далеко не ограничивается приведенными выше сведениями. Она была значительно полнее и разнообразнее и остается активной в настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Голицын Г.С. Затухание малых колебаний в атмосфере благодаря вязкости и теплопроводности // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1965. Т. 1. № 2. С. 136–149.
- Голицын Г.С., Арефьев В.Н., Гречко Е.И., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Семенов В.К. Газовый состав атмосферы и его изменения // Оптика атмосферы и океана. 1996. Т. 9. № 9. С. 1214–1232.
- Голицын Г.С., Гранберг И.Г., Еланский Н.Ф. Инновационные методы оценки качества воздушной среды курортов Кавминвод // Международная научно-практическая конференция: «Биоресурсы биотехнологии и инновации юга России». Сб. научн. тр. Пятигорск, 2003 г. С. 125–134.
- Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Березин В.М., Кузнецов Г.И. Распределение и основные источники газовых примесей в атмосфере по наблюдениям вдоль Транссибирской железной дороги с помощью вагона-лаборатории // В кн.: «Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности» / Под ред. А.Н. Дмитриевского. М.: 2000. С. 289–297.
- Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Маркова Т.А., Панин Л.В. Режим приземного озона над континентальными районами России // В кн. «Глобальные изменения климата и их последствия» / Под ред. Голицына Г.С., Израэля Ю.А. М.: 2002. С. 195–211.
- Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Богданов В.М., Мозерин В.С., Грисенко А.М., Решетов В.В. Поезд-лаборатория для оценки состояния окружающей среды // Конференция «Инновации в эксплуатации и развитии инфраструктуры железнодорожного транспорта». 24–25 июня 2004 г. / Сб. научн. тр. Щербинка, 2004 г. С. 19–22.
- Голицын Г.С., Чунчузов Е.П. Акустико-гравитационные волны в атмосфере Полярные сияния и свечение ночного неба. Результаты исследований по международным геофизическим проектам // Полярные сияния и свечение ночного неба. 1975. № 23. С. 5–21.
- Еланский Н.Ф., Арабов А.Я. Измерения содержания двуокси азота в атмосфере во время солнечного затмения 31 июля 1981 г. // Изв. АН СССР, ФАО. 1982. № 6. С. 667–669.
- Еланский Н.Ф., Беликов И.Б., Голицын Г.С., Грисенко А.М., Лаврова О.В., Панкратова Н.В., Сафронов А.Н., Скороход А.И., Шумский Р.А. Наблюдения состава атмосферы в московском мегаполисе с передвижной лаборатории // Докл. АН. 2010. Т. 432. № 2. С. 250–256.
- Еланский Н.Ф., Голицын Г.С., Власенко Т.С., Волох А.А. Летучие органические соединения в приземном воздухе по наблюдениям вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали // Докл. АН. 2000. Т. 373. № 6. С. 816–821.
- Еланский Н.Ф., Голицын Г.С., Крутцен П.Й., Беликов И.Б., Бренникмайер К.А.М., Скороход А.И. Наблюдения состава атмосферы над Россией: Эксперименты TROICA // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т.61. № 1. С. 79–98.
<https://doi.org/10.31857/S0002351521010041>
- Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б., Панкратова Н.В. Фотохимическая генерация озона в шлейфах антропогенных выбросов над Хабаровским краем // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2005. Т. 41. № 4. С. 511–519.
- Исидоров В.А., Прилепский Э.Б., Федоров Ю.Н. Геотермальные источники летучих органических соединений // Докл. АН. 1991. Т. 319. С. 1106–1109.
- Контроль состояния воздушного бассейна г. Москвы. ИФА РАН. Препринт. Ч. 1. 1991. Ч. 2, 3. 1992.
- Крутцен П.Й., Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Бренникмайер К.А.М., Шарффе Д., Беликов И.Б., Елохов А.С. Наблюдения малых примесей в атмосфере над территорией России с использованием железнодорожного вагона-лаборатории // Докл. АН. 1996. Т. 350. № 6. С. 819–823.
- Моисеенко К.Б., Березина Е.В., Васильева А.В., Штабкин Ю.А., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б. NO_x-лимитирующий режим фотохимической генерации озона в слабо загрязненном конвективном пограничном слое: наблюдения на высотной мачте ЗОТТО в Центральной Сибири в 2007–2015 гг. // Докл. АН. 2019. Т. 487. № 6. С. 669–673.
<https://doi.org/10.31857/S0869-56524876669-673>
- Моисеенко К.Б., Штабкин Ю.А., Березина Е.В., Скороход А.И. Региональные фотохимические источники приземного озона в Европе и Западной

- Сибири // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. №6. С. 645–6458. <https://doi.org/10.15372/AOO20231006>
- Моисеенко К.Б., Штабкин Ю.А., Васильева А.В., Скороход А.И., Фёдорова Е.И. Региональные источники и сезонный цикл метана в Центральной Сибири и Арктике: наблюдения и численные эксперименты // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 18. С. 822–833.
- Скороход А.И., Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Томпсон Р.Л., Новигатский А.Н., академик РАН Голицын Г. С. Атмосферный метан и его изотопный состав над морями российской Арктики по результатам судовых измерений летом и осенью 2015 года // Докл. АН. 2016. Т. 470. № 5. С. 580–584. <https://doi.org/10.7868/S0869565216290247>
- Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Васильева А.В., Хайманн М. Источники и вариации тропосферного СО в центральной Сибири: численные эксперименты и наблюдения на высотной мачте ZOTTO // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 51–63. <https://doi.org/10.7868/S0002351516010090>
- Bergamaschi P., Brenninkmeijer C.A.M., Hahn M., Rockmann T., Schaffe D., Crutzen P.J., Elansky N.F., Belikov I.B., Trivett N.B.A., Worthy D.E.J. Isotope analysis based on source identification for atmospheric CH₄ and CO sampled across Russia using the Trans-Siberian railroad // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № D7. P. 8227–8235.
- Crutzen P.J. Ozone Production Rates in an Oxygen Hydrogen-Nitrogen Oxide Atmosphere // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 7311.
- Crutzen P.J., Elansky N.F., Hahn M., Golitsyn G.S., Brenninkmeijer C.A.M., Scharffe D., Belikov I.B., Maiss M., Bergamaschi P., Rockmann T., Grisenko A.M., Sevostyanov V.V. Trace gas measurements between Moscow and Vladivostok using the Trans-Siberian railroad // J. Atm. Chemistry. 1998. V. 29. № 2. P. 179–194.
- Dedikov J.V., Akopova G.S., Gladkaja N.G., Piotrovsky A.S., Markellov V.A., Salikhov S.S., Kaesler H., Ramm A., Mueller von Blumencron A., Lelieveld J. Estimating methane releases from natural gas production and transmission in Russia // Atm. Env. 1999. V. 33. P. 3291–3299.
- Elansky N.F., Belikov I.B., Berezina E.V., Brenninkmeijer C.A.M., Buklikova N.N., Crutzen P.J., Elansky S.N., Elkins J.V., Elokhoval A.S., Golitsyn G.S., Gorchakov G.I., Granberg I.G., Grisenko A.M., Holzinger R., Hurst D.F., Igaev A.I., Kozlova A.A., Kopeikin V.M., Kuokka S., Lavrova O.V., Lisitsyna L.V., Moeseenko K.B., Oberlander E.A., Obvintsev Yu.I., Pankratova N.V., Postlyakov O.V., Putz E., Romashkin P.A., Safronov A.N., Shenfeld K.P., Skorokhod A.I., Shumsky R.A., Tarasova O.A., Turnbull J.C., Vartiainen E., Weissflog L., Zhernikov K.V. Atmospheric Composition Observations over Northern Eurasia using the Mobile Laboratory: TROICA Experiments. Moscow: ISTC Publ. 2009. 73 p. <http://www.ifaran.ru/troica/index.html>
- Elansky N.F., Golitsyn G.S., Belikov I.B., Markova T.A., Panin L.V., Vlasenko T.S., Crutzen P.J., Brenninkmeijer C.A.M., Ivanova A.R., and Shakina N.P. Surface ozone concentration over Russia from TROICA experiments // Quadrennial Ozone Symposium “Atmospheric Ozone” 3–8 July 2000. Proc. Sapporo, Japan. P. 825–828.
- Elansky N.F., Golitsyn G.S., Vlasenko T.S., Volokh A.A. Concentrations of Volatile Organic Compounds in Surface Air along the Trans-Siberian Railroad // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S10–S23.
- Elansky N.F., Lavrova O.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B. Trace Gases in the Atmosphere over Russian Cities // Atm. Env. 2016. V. 143. P. 108–119. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.046>
- Engvall-Stjernberg A.-C., Skorokhod A.I., Elansky N.F., Paris J.-D., Nédélec P., & Stohl A. Low surface ozone in Siberia // Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. 2012. V. 64. P. 11607. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v64i0.11607>
- Golitsyn G.S., Elansky N.F., Markova T.A., Panin L.V. Surface Ozone behavior over Continental Russia // Izv. Atmospheric and Oceanic Physics. 2002. V. 38. Suppl. 1. P. S116–S126.
- Golitsyn G.S., Grechko E.I., Elansky N.F., Pugachev N.S. Some Soviet measurements of trace gases // Tellus A: Dinamic Meteorology and Oceanography. 1991. V 43. № 4. P. 264–275.
- Golitsyn G.S., Gruzdev A.N., Elansky N.F., Perzev N.N., Shefov N.N. Studies of structure of orographic lee waves. // International Symp. of the Qinghai-Xizang Plateau and mountain meteorology. 20–24 March 1984. Proc. Beijing, China. P. 854–864.
- Heimann M., Schulze E.D., Winderlich J., Andreae M., Chi X., Gerbig C., Kolle O., Kübler K., Lavric J.V., Mikhailov E., Panov A., Park S., Rödenbeck C., Skorokhod A. The Zotino Tall Tower Observatory (ZOTTO): Quantifying Large Scale Biogeochemical Changes in Central Siberia // Nova Acta Leopoldina NF. 2014. V. 117(399). P. 51–64.
- Hurst D.F., Romashkin P.A., Elkins J.W., Oberlander E.A., Elansky N.F., Belikov I.B., Granberg I.G., Golitsyn G.S., Grisenko A.M., Brenninkmeijer C.A.M., Crutzen P.J. Emissions of ozone-depleting substances in Russia during 2001 // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D14303. <https://doi.org/10.1029/2004JD004633>

- Moiseenko K.B., Vasileva A.V., Skorokhod A.I., Belikov I.B., Repin A.Yu., Shtabkin Yu.A.* Regional impact of ozone precursor emissions on NO_x and O₃ levels at ZOTTO tall tower in central Siberia // *Earth Space Sci.* 2021. V. 8. e2021EA001762. <https://doi.org/10.1029/2021EA001762>
- Oberlander E.A., Brenninkmeijer C.A.M., Crutzen P.J., Elansky N.F., Golitsyn G.S., Granberg I.G., Scharffe D.H., Hofmann R., Belikov I.B., Paretzke H.G., van Velthoven P.F.J.* Trace gas measurements along the Trans-Siberian railroad: the TROICA 5 expedition // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. № D14. P. 4206. (ACH 13-1 – 13-15). <https://doi.org/10.1029/2001JD000953>
- Reshetnikov A.I., Paramonova N.N., Shashkov A.A.* An evaluation of historical methane emissions from the Soviet gas industry // *J. Geophys. Res.* 2000. V. 105. № D3. P. 3517–3529.
- Savinykh V.V., Elansky N.F., Gruzdev A.N.* Interannual variations and long-term trends in total ozone over the North Caucasus // *Atmospheric Environment.* 2021. V. 251. P. 118252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118252>
- Senik I.A., Elansky N.F.* Surface Ozone Concentration Measurements at the Kislovodsk High-Altitude Scientific Station: Temporal Variations and Trends // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics.* 2001. V. 37. Suppl. 1. P. S110–S119.
- Tarasova O.A., Brenninkmeijer C.A.M., Assonov S.S., Elansky N.F., Röckmann T., Brass M.* Atmospheric CH₄ along the Trans-Siberian railroad (TROICA) and river Ob: Source identification using stable Isotopes analysis // *Atm. Environment.* 2006. V. 40. № 29. P. 5617–5628.
- Weissflog L., Elansky N., Putz E., Krueger G., Lange Ch.A., Lisitzyna L., Pfennigsdorff A.* Trichloroacetic acid in the vegetation of polluted and remote areas of both Hemispheres – Part II: salt lakes as novel sources of natural chlorohydrocarbons // *Atmospheric Environment.* 2004. V. 38. № 25. P. 4197–4204.

THE HARD 90s – THE TIME OF MAJOR PROJECTS TO STUDY THE COMPOSITION OF THE ATMOSPHERE

© 2025 N. F. Elansky

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Pyzhevsky per., 3, bld. 1, Moscow, 119017 Russia

e-mail: n.f.elansky@mail.ru

The aggravation of the problems of changing the state of the ozone layer and the Earth's climate in the 90s caused the rapid development of atmospheric composition studies. The creation of more advanced numerical models in order to predict possible consequences required an expansion of the number of measured species and more detailed information about their chemical interactions in the atmosphere. The IAP RAS is one of the few scientific centers in the countries of the former USSR, which followed the global trend in the conditions of the economic and political crisis. The article summarizes the main achievements of the Institute in the field of improving the atmospheric composition observation system and studying the processes of transport and chemical transformation of species in the period from 1990 to 2008, when G.S. Golitsyn headed the IAP RAS.

Keywords: atmospheric composition, ozone, greenhouse gases, emission of pollutants into the atmosphere, carbon balance