

УДК 551.510

ДВОЙНОЙ ПОРТРЕТ: ВКЛАД Г.С. ГОЛИЦЫНА И П.Й. КРУТЦЕНА В ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКИ И ХИМИИ АТМОСФЕРЫ

© 2021 г. К. А. М. Бреннинкмайер^а, А. С. Гинзбург^{б, *}, Н. Ф. Еланский^б, И. И. Мохов^{б, с}

^аИнститут химии Макса Планка, Хан-Мейенер ул., 1, Майнц, 55128 Германия

^бИнститут физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Пыжевский пер., 3, Москва, 109017 Россия

^сМосковский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: gin@ifaran.ru

Поступила в редакцию 30.09.2020 г.

После доработки 12.10.2020 г.

Принята к публикации 14.10.2020 г.

Вступительная статья к специальному выпуску журнала “Известия РАН. Физика атмосферы и океана”, посвященному присуждению Большой золотой медали Российской академии наук имени М.В. Ломоносова 2019 года академику РАН Георгию Сергеевичу Голицыну “за выдающийся вклад в изучение физики атмосферы Земли и планет и разработку теории климата и его изменений” и иностранному члену РАН профессору Паулю Йозефу Крутцену “за выдающийся вклад в химию атмосферы и оценку роли и биогеохимических циклов в формировании климата”. В этот выпуск журнала включены: статья, освещающая вклад Г.С. Голицына и П.Й. Крутцена в исследование физики и химии атмосферы, климата и биогеохимических циклов, а также статьи, написанные для этого специального выпуска с участием лауреатов и по их и редколлегии рекомендации.

Ключевые слова: физика и химия атмосферы, биогеохимические циклы, климат и его изменения

DOI: 10.31857/S000235152101003X

ВВЕДЕНИЕ: ДВОЙНОЙ ПОРТРЕТ ЛАУРЕАТОВ



Эти фотографии Г.С. Голицына и П.Й. Крутцена сделаны примерно десять лет назад и хорошо демонстрируют мудрый и пылливый взгляд настоящих ученых. Фотография Г.С. Голицына

сделана его дочерью Анной в подмосковном доме Голицыных (взято из статьи “Голицын, Георгий Сергеевич” на сайте <https://ru.wikipedia.org/wiki/>), фотография П.Й. Крутцена сделана в универси-

тете Хельсинки (https://en.wikipedia.org/wiki/Paul_J._Crutzen).

Академик Г.С. Голицын и профессор П.Й. Крутцен практически ровесники и оба за многие десятилетия своей успешной деятельности достигли всемирного призвания как выдающиеся ученые и крупные организаторы науки. Научному сообществу может быть интересно сравнить жизненные пути двух лауреатов высшей научной награды Российской академии наук.

Пауль Йозеф Крутцен (Paul Josef Crutzen) родился 3 декабря 1933 года в Амстердаме (Нидерланды). В 1951 году он окончил Колледж Св. Игнатия, а в 1954 – курс обучения по специальности Civil Engineering.

П.Й. Крутцен в молодые годы проходил срочную военную службу и работал в конструкторских бюро (Bridge Construction Bureau of the City of Amsterdam, The Netherlands и House Construction Bureau, Gävle, Sweden),

С 1959 года он связал свою жизнь с науками об атмосфере, работая сначала на факультете метеорологии университета Стокгольма, затем в Национальном центре атмосферных исследований в Боулдере и на факультете атмосферных наук в университете штата Колорадо (США).

В 1968 году П.Й. Крутцен защитил диссертацию “Определение параметров, входящих в “сухую” и “мокрую” фотохимические теории озона в стратосфере” (“Determination of parameters appearing in the “dry” and the “wet” photochemical theories for ozone in the stratosphere”) на получение степени доктора философии (Ph.D.). В защите принимал участие выдающийся шведский ученый Берт Болин (Bert Bolin). В 1973 году П.Й. Крутцен защитил диссертацию “О фотохимии озона в стратосфере и тропосфере и загрязнении стратосферы высоколетящими самолетами” (“On the photochemistry of ozone in the stratosphere and troposphere and pollution of the stratosphere by high-flying aircraft”) на степень доктора наук (D.Sc.). Консультантами этой работы были известные британские ученые Джон Хоутон (John Houghton) и Ричард Уэйн (R.P. Wayne). Обе диссертации были отмечены как наивысшие достижения в данной области науки.

В течение двух десятилетий (1980–2000 гг.) П.Й. Крутцен был директором Отдела химии атмосферы в Институте химии общества Макса Планка в Майнце (Германия), с 1992 по 2008 год – заслуженный профессор в Скрипптовском институте океанологии (Калифорния, США). (Distinguished Professor (part-time), Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego, La Jolla, USA).

В настоящее время П.Й. Крутцен является почетным членом Общества Макса Планка (Германия); почетным директором Департамента химии атмосферы Института химии Макса Планка (Гер-

мания); почетным исследователем Международного института системных исследований (Австрия); почетным профессором Скрипптовского института океанологии Калифорнийского университета (США).

Профессор П.Й. Крутцен избран членом более десяти национальных и международных академий наук, в том числе иностранным членом Российской академии наук. Один только перечень его должностей, научных наград, членства в академиях, советах, комитетах и редколлегиях занимает 16 страниц на сайте Института химии Макса Планка (<https://www.mpic.de/3864937/curriculum-vitae>).

В 2016 году в издательстве Springer в серии “Кратко о лидерах науки и практики: Нобелевские лауреаты” (“Briefs on Pioneers in Science and Practice. Nobel Laureates”) была опубликована монография “Пауль Й. Крутцен: Первопроходец в науках о химии атмосферы и изменении климата во времена Антропоцена” (“Paul J. Crutzen: A Pioneer on Atmospheric Chemistry and Climate Change in the Anthropocene”), в которой подробно описан жизненный и научный путь лауреата нобелевской премии профессора П.Й. Крутцена.

Георгий Сергеевич Голицын родился в Москве 23 января 1935 года. В 1952 году он с золотой медалью окончил московскую среднюю школу № 126, а в 1958 году – с отличием физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. В том же году стал сотрудником Института физики атмосферы, созданного А.М. Обухова за два года до этого, и работает в этом институте по сей день.

В 1961 году Г.С. Голицын на ученом совете физфака МГУ защитил кандидатскую диссертацию “К теории ударных волн и флуктуационных явлений в магнитной гидродинамике”. В 1971 году на ученом совете Астрономического института им. П.К. Штернберга защитил докторскую диссертацию “Динамика планетных атмосфер”. Его докторская диссертация начиналась фразой: “В атмосферах планет дуют ветры”.

В 1979 году Г.С. Голицын был выбран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1987 году – ее действительным членом. С 1988 по 2001 год он был членом Президиума АН СССР, а затем РАН. В течение многих лет он был председателем Научного совета АН СССР/РАН “Исследования по теории климата Земли”.

В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова АН СССР (ныне РАН) Г.С. Голицын руководил Лабораторией энергетики планетных атмосфер, Лабораторией теории климата, Отделом исследования климатических процессов, Лабораторией взаимодействия атмосферы и океана. С 1990 года в течение двух десятилетий был директором Института. В настоящее время он заведующий Отделом динамики атмосферы ИФА им. А.М. Обухова РАН.

Результаты исследований Г.С. Голицына в самых различных областях физики, гидродинамики и наук об окружающем мире представлены в 400 статьях, опубликованных в российских и зарубежных научных изданиях. Он автор шести монографий, три из которых переведены на иностранные языки. В течение трех десятилетий он преподавал в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, является заслуженным профессором Московского университета (с 1999 года). В Московском физико-техническом институте Г.С. Голицын преподает с 1976 года по настоящее время.

Активная жизненная позиция Г.С. Голицына особенно ярко проявилась в период 1990–2008 гг., когда он был директором Института физики атмосферы. Под его руководством Институту физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН удалось не только пережить “лихие 90-е” прошлого века, но и преумножить научный потенциал Института, его престиж в российской и мировой науке. Под идейным и практическим руководством Г.С. Голицына были проведены крупномасштабные эксперименты по изучению взаимодействия атмосферы, океана и суши, солнечной и тепловой радиации и облачности, комплексные исследования дымовых аэрозолей, климатических эффектов интенсивных пыльных бурь.

Очень большую роль Г.С. Голицын сыграл в развитии международного сотрудничества. Здесь отметим организованную в 2007 г. совместную лабораторию по исследованиям атмосферы и климата двух Институтов физики атмосферы Российской и Китайской академий наук. Он дважды (в 1982–1987 гг. и 1992–1997 гг.) избирался членом Объединенного научного комитета, который управляет Всемирной программой исследования климата, в течение пяти лет (1992–1997 гг.) был председателем научного совета Международного Института прикладного системного анализа (Вена, Австрия).

Академик Г.С. Голицын Почетный ученый Международного института прикладного системного анализа (Honorary Scholar of IASA), Почетный член Королевского метеорологического общества Великобритании (Honorary Fellow of Royal Meteorological Society), член Европейской академии и Европейского союза наук о Земле. Он отмечен высшей наградой Европейского союза наук о Земле — медалью Альфреда Вегенера за выдающиеся заслуги в области наук об атмосфере, океане и климате.

Г.С. Голицын награжден многими российскими государственными и академическими наградами, в том числе орденом Почета и орденом “За заслуги перед Отечеством” IV степени. Среди его академических наград особое место занимает Золотая медаль имени А.М. Обухова РАН за работы, “внесшие выдающийся вклад в исследования магнитной гидродинамики, разработку ряда теорий в области планетологии, теории климата, физики атмосферы и геофизики: общей циркуляции планетных атмосфер, возникновения ураганов и других интенсивных атмосферных вихрей, радиационных эффектов и теплообмена между океаном и атмосферой и ряда других природных процессов и явлений”. Он удостоен премии имени А.А. Фридмана за цикл работ по исследованиям общей циркуляции атмосферы и конвекции, премии имени Б.Б. Голицына за монографию “Статистика и динамика природных процессов и явлений: методы, инструментарий, результаты”, Демидовской премии за выдающиеся заслуги в области наук о Земле.

В приведенной ниже таблице для наглядности параллельно представлены основные этапы жизни и научной карьеры Г.С. Голицына и П.Й. Крутцена.

Как уже отмечалось, списки научных, научно-популярных и биографических публикаций каждого из лауреатов, награжденных Большой золотой медалью Российской академии наук имени М.В. Ломоносова 2019 года, содержат

Таблица 1. Сравнительное жизнеописание Г.С. Голицына и П.Й. Крутцена

Г.С. Голицын	Годы	Пауль Крутцен
Родился 23 января 1935 г.	30-е годы XX века	Родился 3 декабря 1933 г.
Школьные годы	40-е годы XX века	Школьные годы (колледж)
Окончание средней школы с золотой медалью (1952) Первая научная статья в ЖЭТФ (1957) Окончание с отличием физического факультета МГУ и начало работы в ИФА (1958)	50-е годы XX века	Окончание Колледжа Св. Игнатия (1951) Завершение обучения по специальности “гражданский инженер” (1954) Служба в армии Начало работы в Стокгольмском университете (1959)

Таблица 1. Окончание

Г.С. Голицын	Годы	Пауль Крутцен
Защита кандидатской диссертации (1961) Ответственный секретарь редколлегии журнала Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана (с 1964)	60-е годы XX века	Получение степени доктора философии (1968)
Защита докторской диссертации (1971) Участие в рейсе Научно-исследовательского судна “Дмитрий Менделеев” (1974) Создание теории подобия для динамики планетных атмосфер Развитие теории конвекции с учетом вращения Избрание членом-корреспондентом АН СССР (1979)	70-е годы XX века	Открытие каталитического цикла разрушения стратосферного озонового слоя окислами азота Получение степени доктора наук (1973) Открытие каталитического механизма образования озона в тропосфере Описание процессов активации хлора в антарктической стратосфере Директор Департамента химии атмосферы Института химии общества Макса Планка (с 1980)
Статья в журнале Tellus “Comparative estimates of climatic consequences of Martian dust storms and a possible nuclear war” Избрание действительным членом АН СССР (1987) Директор Института физики атмосферы АН СССР (с 1989) Главный редактор журнала Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана (с 1989) Премия АН СССР имени А.А. Фридмана (1990)	80-е годы XX века	Директор Отдела химии атмосферы Института химии общества Макса Планка Статья “Последствия: Сумерки в полдень” в журнале Ambio, положившая начало исследованиям гипотезы “ядерной зимы”
Директор Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН Председатель Совета Международного института прикладного системного анализа (1992–1997) Демидовская премия за выдающиеся достижения в области наук о Земле (1995) Старт проекта TROICA (1995) Избрание членом Академии наук Европы (1999)	90-е годы XX века	Директор Отдела химии атмосферы Института химии общества Макса Планка (по 2000) Заслуженный профессор Скриптовского института океанологии (1992) Нобелевская премия по химии (1995) Старт проекта TROICA (1995) Иностраннный член Российской академии наук (1999)
Директор Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (до 2008) Медаль Альфреда Вегенера – высшая награда Европейского союза наук о Земле (2004) Создание Российско-Китайской лаборатории по исследованиям атмосферы и климата (2007)	Первое десятилетие XXI века	Почетный член многих университетов и научных обществ Публикация статьи, положившей начало обсуждению гипотезы Антропоцена
Премия имени Б.Б. Голицына (2016) Золотая медаль имени А.М. Обухова (2018) Большая золотая медаль Российской академии наук имени М.В. Ломоносова (2019)	10-е годы XXI века	Почетный член Королевского химического общества (Нидерланды, 2017) Большая золотая медаль Российской академии наук имени М.В. Ломоносова (2019)

сотни наименований. Кроме того, имеется множество статей, развивающих идеи и освещающих жизнь и деятельность лауреатов. Многие из этих публикаций приведены в предыдущих персоналиях Г.С. Голицына и П.Й. Крутцена.

Сами лауреаты премии Ломоносова отмечают, что наиболее полно их научный путь отражен в монографиях последнего десятилетия [1, 2], обложки которых представлены на рисунке. В начале списка литературы приведены ссылки на основные монографии академика Голицына [3–8], профессора Крутцена [9–15] и на их совместную фундаментальную публикацию, посвященную проблеме взаимосвязи глобального потепления, истощения озонового слоя и других аспектов глобальных экологических изменений [16].

Г.С. ГОЛИЦЫН: АТМОСФЕРА И КЛИМАТ, СТАТИСТИКА И ЭНЕРГЕТИКА ПРИРОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

В этом разделе кратко перечислены основные этапы научного пути академика Г.С. Голицына. Они в данной статье описаны относительно кратко, поскольку читатели журнала “Известия РАН. Физика атмосферы и океана” хорошо знакомы с его статьями и персоналиями, опубликованными в нашем журнале.

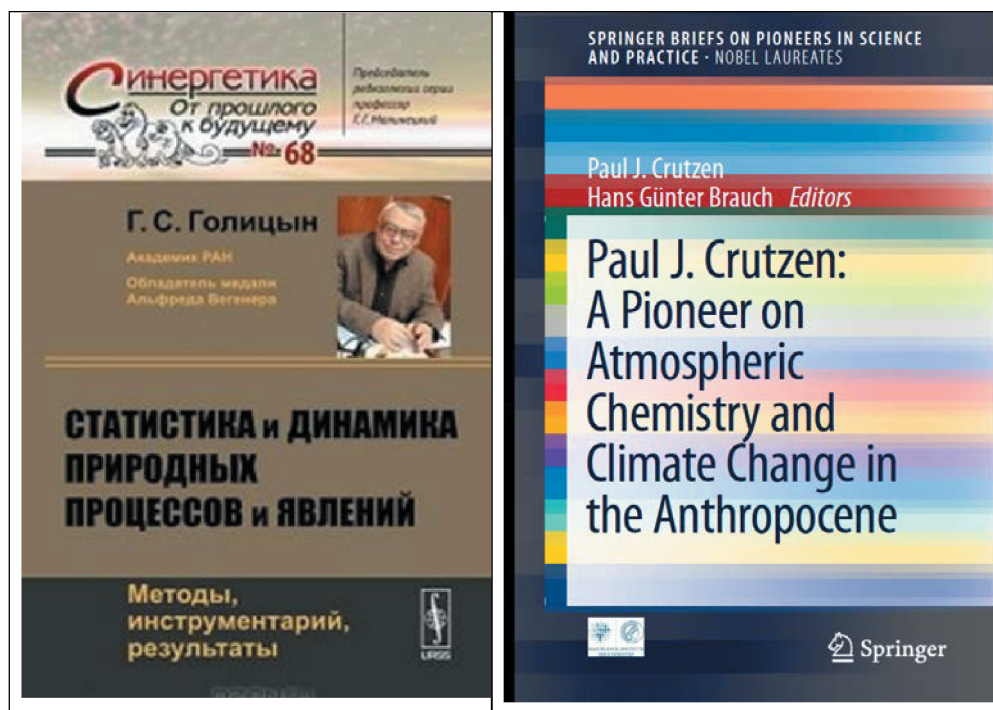
Первую научную статью, посвященную некоторым вопросам магнитной гидродинамики, Г.С. Голицын в соавторстве со своим научным руководи-

телем К.П. Станюковичем опубликовал в 1957 г., будучи еще студентом физфака МГУ.

Как отмечает сам Г.С. Голицын, за свою долгую научную жизнь ему пришлось заниматься многими различными предметами: “магнитной гидродинамикой, распространением различных волн в турбулентных средах, планетными атмосферами, конвекцией в различных, в том числе вращающихся, средах, спектром космических лучей, теорией землетрясений, постановкой и руководством природных экспериментов, в том числе международных, теорией морских ветровых волн и их ролью в распространении загрязнений на водной поверхности, теорией ураганов, объяснением экспериментальных результатов по статистической структуре рельефа планетных поверхностей и рядом других процессов и явлений”.

Г.С. Голицын получил важные новые результаты в области магнитной гидродинамики и в исследовании атмосферы, изучении волновых движений различной природы в атмосфере, в интерпретации данных измерений на космических аппаратах, теоретической планетологии и теории климата, изучении конвекции как гидродинамического явления, а также исследовании теплообмена между океаном и атмосферой. Им оценены скорости конвективных движений в атмосфере, океане и мантии Земли.

Г.С. Голицын один из авторов концепции “ядерной зимы” – изменений термического и динамического режимов задымленной атмосферы и



климатических последствий возможной ядерной войны. В 1980-е годы Г.С. Голицын являлся членом рабочей группы ООН по климатическим и иным последствиям ядерной войны. По докладу этой группы 44-я Генеральная ассамблея ООН в 1988 г. приняла резолюцию о недопустимости ядерной войны.

Важную роль сыграл Г.С. Голицын в процессе обсуждения и принятия Россией Киотского протокола, отстаивая на самом высоком уровне научно обоснованные положения теории климата и роли антропогенных факторов в процессе глобального потепления.

В числе основных научных результатов Г.С. Голицына:

- создание в конце 1960-х годов (время, когда еще не было численных моделей общей циркуляции атмосферы) теории подобия для планетных атмосфер, определяющей ключевые особенности динамики атмосфер планет Солнечной системы циркуляции;

- описание механизма глобальных пылевых бурь на Марсе в начале 1970-х годов;

- развитие основ теории климата, в том числе исследования чувствительности, устойчивости и экстремальных свойств климатической системы, изменений гидрологического режима в бассейне Каспийского моря и Ладожского озера, изменений температуры в средней и верхней атмосфере;

- экспериментальные и теоретические исследования в области геофизической конвекции и турбулентности;

- системные исследования статистики и энергетики природных процессов и явлений;

- описание процессов взаимодействия атмосферы и океана, развитие теории тепло-массообмена между атмосферой и океаном при слабых ветрах;

- разносторонние исследования процессов формирования и статистики тропических циклонов, полярных мезоциклонов, внетропических циклонов и антициклонов;

- исследование феномена “ядерной зимы” – климатических последствий возможной ядерной войны;

- руководство комплексным проектом по исследованию роли облачности и аэрозоля в процессах переноса солнечной и тепловой радиации;

- теоретическое объяснение результатов натурных экспериментов по расплыванию по поверхности океана пятен примеси.

Развитая Г.С. Голицыным теория динамики планетных атмосфер имеет исключительное значение для понимания особенностей атмосферной и климатической динамик на Земле.

Одним из крупнейших региональных изменений климата на Земле в последние десятилетия было сильное изменение уровня Каспийского моря в 20 веке. В рамках российско-германского проекта под руководством Г.С. Голицына были исследованы механизмы изменений гидрологического режима, включая осадки, испарение, речной сток, в бассейне Каспийского моря при изменениях глобального климата. В том числе выявлена значимая связь изменений уровня Каспийского моря, стока Волги и осадков в бассейне с аномалиями температуры в тропической части Тихого океана – в области формирования явлений Эль-Ниньо. Эта связь была подтверждена в численных экспериментах с климатической моделью общей циркуляции. Получены прогностические модельные оценки со значительным увеличением стока Волги в 21 веке при существенном падении стока в первой трети века.

Значительный вклад Г.С. Голицын внес в исследования режимов атмосферных вихрей – тропических циклонов, полярных мезоциклонов, внетропических циклонов и антициклонов. Сделаны оценки на основе теории размерности и подобия, дана физическая интерпретация особенностям функций распределений, полученных на основе данных наблюдений, реанализа и модельных расчетов. Для значительной части атмосферных вихрей характерны экспоненциальные распределения в соответствии с распределениями Больцмана–Гиббса. При этом океан играет роль гигантского термостата, а для связанной с океаном атмосферы флуктуации распределены по экспоненте. Исключения составляют “хвосты” распределений, для которых характерны существенные отклонения от общего экспоненциального распределения.

Особое значение имеет использование Г.С. Голицыным общего методологического подхода к исследованию самых разнообразных процессов – от атмосферных микромасштабов до процессов во Вселенной. В круге его интересов и космические лучи, и планетотрясения – не только землетрясения, вулканическая активность, динамика литосферных плит, рельеф поверхности планет. Важное место в исследованиях Г.С. Голицына занимают исследования морского волнения, взаимодействия атмосферы и океана.

В рамках Советской программы климатологии облачности и радиации, которой руководил Г.С. Голицын, был проведен целый ряд уникальных исследований, в том числе в рамках Звенигородских экспериментов. Эти исследования получили продолжение в рамках международной программы ARM.

Особо надо отметить роль Г.С. Голицына в организации и руководстве (совместно с П.И. Крутценом) проектом TROICA (Trans-Continental Ob-

servations Into the Chemistry of the Atmosphere), в рамках которого было совершено 12 поездок вдоль Транссиба от Москвы до Дальнего Востока, 3 – с севера на юг от Мурманска до Кисловодска и Сочи, а также по большой кольцевой дороге вокруг Москвы.

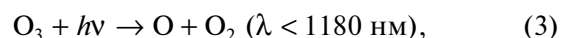
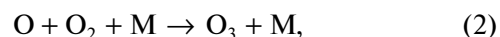
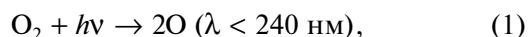
Полный список трудов Г.С. Голицына до 2010 года опубликован в издании “Георгий Сергеевич Голицын. М.: Наука, 2010 (Материалы к биобиблиографии ученых, физические науки, вып. 49)”. В 2015 году в журнале “Известия РАН. Физика атмосферы и океана” в редакционной статье, посвященной 80-летию Г.С. Голицына, представлены его публикации за 2010–2014 гг.

Академик Г.С. Голицын продолжает активную научную деятельность. Широту и разнообразие научных интересов Г.С. Голицына хорошо иллюстрирует перечень его публикаций за последние пять лет [16–41]. Кроме публикации оригинальных научных статей Г.С. Голицын активно участвует в проведении различных российских и международных научных конференций. Особое место среди них занимает конференция, посвященная столетию основателя Института физики атмосферы академика А.М. Обухова, труды которой опубликованы в книге “Турбулентность, динамика атмосферы и климата”, вышедшей в издательстве “Физматкнига” в 2018 году [43].

П.Й. КРУТЦЕН: ХИМИЯ АТМОСФЕРЫ

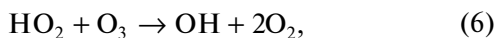
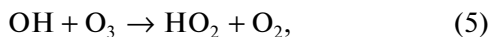
Основные направления научных исследований П.Й. Крутцена – химия тропосферы и стратосферы, роль биохимических циклов в формировании и изменениях климата. За достижения в этой области он получил Нобелевскую премию по химии в 1995 году вместе с Марио Молиной (Мексика) и Шервудом Роулендом (США). Ключевым результатом его исследований, показавшим возможность катастрофического воздействия человеческой деятельности на состояние окружающей среды, явилось доказательство того, что азотные соединения антропогенного происхождения определяют разрушение стратосферного озона и образование высоких концентраций озона в тропосфере. Научные достижения П.Й. Крутцена подробно описаны во многих изданиях, в частности, в [2].

В течение нескольких десятилетий в соответствии с теорией С. Чепмена [44], опубликованной в 1930 г, считалось, что озоновый слой находится в состоянии устойчивого фотохимического равновесия. Образование “нечетного кислорода” ($O_x = O + O_3$) происходит в результате фотолиза молекулярного кислорода O_2 солнечным излучением, а разрушение озона O_3 – в процессе рекомбинации O и O_3 :



Поскольку озоновый слой формирует благоприятный для биосферы радиационный баланс на земной поверхности и вносит существенный вклад в тепловой баланс Земли, то наблюдениям озона уделялось большое внимание. При подготовке к Международному геофизическому году (1957 г.) и в ходе его проведения была создана глобальная сеть озонометрических станций. Только в России в это время начали регулярные наблюдения около 30 станций [45]. По данным наблюдений спектрального состава УФ отраженной от Земли солнечной радиации на российском спутнике Космос-121 в июне 1966 г. были построены первые карты глобального распределения озона [46]. Анализ данных многочисленных наблюдений показал большое влияние динамических процессов различного масштаба на пространственно-временную изменчивость озона [47]. Моделирование состояния озонового слоя путем решения уравнений переноса с включенным в них фотохимическим циклом Чепмена стало эффективным инструментом исследований воздействия на содержание озона атмосферной циркуляции, солнечной активности, волновых процессов и других факторов. Несколько таких аналитических и численных моделей было разработано в 1960–70-е годы на физическом факультете Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова под руководством профессора А.Х. Хргиана. В частности, одним из авторов настоящей статьи была построена аналитическая трехмерная модель воздействия на распределение озона струйного течения в верхней тропосфере, учитывающая спиральность воздушного потока, чепменовскую фотохимию в стратосфере и сухое осаждение озона на земной поверхности [48]. Проведенные расчеты продемонстрировали характерные особенности распределения озона в области полярных и субтропических струйных течений и подтвердили результаты наблюдений со спутника Космос-121 [46].

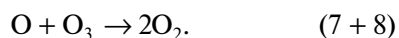
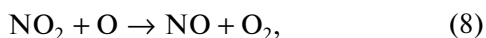
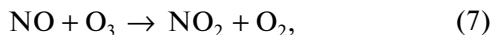
Вместе с тем, модельные построения вертикального распределения озона, как правило, заметно отличались от результатов измерений, проводимых с помощью озонозондов. Д. Бейтс и М. Николе [49] высказали предположение, что быстрое образование нечетного кислорода в мезосфере могут компенсировать каталитические реакции разрушения озона с участием радикалов OH и HO_2 . Принимая во внимание это предположение и результаты лабораторных экспериментов по оценке скоростей реакций, выполненных группой сотрудников Кембриджского университета [50, 51], Дж. Хэмпсон [52] постулировал реакции



как каталитический цикл разрушения озона в стратосфере. Этот цикл, введенный Б. Хантом [10] в фотохимическую стратосферную модель, приводил к результатам, значительно лучше согласующимся с данными наблюдений.

Включившись в работу по химии атмосферы, П.И. Крутцен [54] обратил внимание на то, что водородный цикл не объясняет вертикального распределения озона в нижней стратосфере и, более того, при выбранных в [52, 53] константах реакций (5) и (6) приводит к нереально быстрому разрушению озона в тропосфере. П.И. Крутцен указал на дополнительный сток OH в тропосфере – его реакцию с метаном (CH_4), и впоследствии показал, что цепь окисления CH_4 играет важную роль в химии тропосферы.

Включение CH_4 в систему фотохимических взаимодействий привело к выводу, что константы реакций (5) и (6) сильно завышены, и потому водородный цикл не может обеспечивать необходимый сток озона в стратосфере. Решение проблемы П.И. Крутцен нашел путем включения в систему взаимодействий окислов азота NO_x ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$) и соответствующего каталитического цикла разрушения озона [55]:



Конечный результат этого цикла (7 + 8) эквивалентен прямой реакции (4). Но при этом эффективность азотного цикла намного выше, поскольку цикл активно действует даже при очень малых концентрациях NO_x . Небольшого количества NO, постоянно образующегося в атмосфере при окислении закиси азота N_2O атомарным кислородом $\text{O}(^1\text{D})$



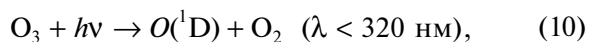
достаточно для того, чтобы азотный цикл играл определяющую роль в разрушении озона в стратосфере на высотах от 25 до 45 км.

Осенью 1970 г. П.И. Крутцен познакомился с материалами исследований критических экологических проблем [56], в которых, в частности, приводились оценки возможных выбросов в стратосферу окислов азота сверхзвуковыми самолетами (Конкорд, Ту-144, Боинг) при их активной эксплуатации. Сравнив интенсивность естественных источников NO_x в стратосфере с выбросами создающегося флота сверхзвуковых самолетов, П.И. Крутцен сразу понял, что человечество стоит

перед глобальной экологической угрозой. Вскоре после напряженной работы П.И. Крутцен сдает в печать статью с расчетами возможного воздействия сверхзвуковой авиации на озоновый слой [57]. В ней наглядно продемонстрирована серьезность проблемы: глобальное изменение озонового слоя будет заметным уже при полетах 500 сверхзвуковых самолетов, а над регионами с высокой интенсивностью полетов могут образовываться серьезные озоновые аномалии. Статья имела огромный научный и общественный резонанс и способствовала бурному развитию физики и химии атмосферы.

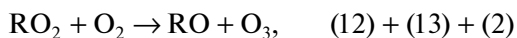
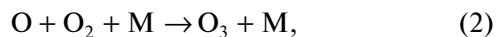
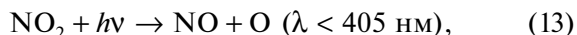
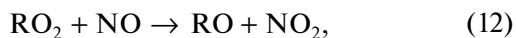
Одним из следствий возникшей полемики было образование в 1976 г. в Институте физики атмосферы АН СССР лаборатории, основной задачей которой являлось исследование атмосферного озона и его газов-предшественников. Лаборатория одной из первых в мире начала регулярные измерения двуокиси азота (NO_2) на созданной на Северном Кавказе высокогорной станции, а также наблюдения пространственно-временной изменчивости NO_2 над Северной Евразией с борта самолета [58–60]. Полученные данные и их последующее использование в моделях стратосферы полностью соответствовали выводам П.И. Крутцена о преобладающей роли азотного цикла в химии озона в средней стратосфере.

Другим, подобным по значимости достижением П.И. Крутцена в области химии атмосферы явилось открытие и обоснование химического механизма образования высоких концентраций озона в тропосфере. Считалось, что источником озона в тропосфере является перенос из стратосферы. Однако эпизоды появления высоких и опасных для здоровья человека концентраций озона в условиях смога, которые особенно часто регистрировались в Калифорнии [61], не могли быть объяснены вторжениями стратосферного воздуха. Предположение о возможном существовании химических источников озона в тропосфере П.И. Крутцен высказал еще в 1969 г. [54]. Однако только после выхода в свет работы Х. Леви III [62] он получил основу для дальнейших исследований в этой области. Х. Леви III представил процесс образования гидроксила OH в виде фотолиза озона коротковолновой солнечной радиацией ($\lambda < 320$ нм) с последующим соединением $\text{O}(^1\text{D})$ и H_2O :



и показал, что OH инициирует процесс окисления CO и CH_4 в атмосфере. Опираясь на полученные Х. Леви III результаты, П.И. Крутцен нашел, что образование озона происходит в каталитическом цикле с участием NO и пероксирадикалов –

продуктов окисления CO, CH₄ и летучих органических соединений (ЛОС) в реакциях:



где R = H, CH₃, либо другие органические пероксирадикалы. Разрушение озона происходит в ходе реакций (5), (6) и (10), (11). Таким образом, каталитическая роль NO имеет двойное значение. В стратосфере на высотах более 25 км азотный цикл приводит к преобладанию разрушения озона над его образованием, а в тропосфере – к преобладанию образования озона над его разрушением. В чистых фоновых условиях, когда концентрация NO имеющая, в основном, антропогенное происхождение, может быть очень низкой (менее 10 ppt), окисление CO, CH₄ и ЛОС приводит к уменьшению содержания озона в воздухе, поскольку большая часть пероксирадикалов RO₂ вступает в реакцию с O₃ (см. (6)).

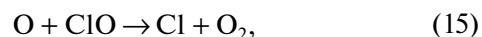
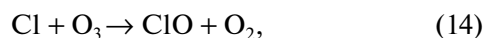
Включение NO в окислительные процессы, способствующие образованию O₃ и OH, имело большое значение для дальнейших исследований в области химии атмосферы и численного моделирования возможных изменений состава атмосферы. В частности, включение реакции (12) в моделирование последствий полетов сверхзвуковых самолетов резко снизило первоначально значительную величину разрушения озонового слоя и сняло остроту этой проблемы.

Выполненное П.Й. Крутценом и П. Циммерманом [63] численное моделирование атмосферы с учетом азотного цикла показало неизбежность возрастания концентрации O₃ и OH в тропосфере в индустриальную эпоху по сравнению с доиндустриальной. Этот результат вызвал обоснованную обеспокоенность не только из-за повышения содержания в воздухе токсичного озона, но и из-за возможных неблагоприятных и плохо предсказуемых последствий, связанных с возрастанием содержания OH. Во-первых, от OH зависит сток из атмосферы CH₄ – наиболее активного парникового газа, а во-вторых, к OH чрезвычайно чувствительна фотохимическая система тропической и субтропической атмосферы. Регулярные природные пожары в сухие сезоны служат активным источником аэрозолей и парниковых и являются важным элементом климатической системы Земли.

Открытие фотохимического механизма образования озона в тропосфере подвело теоретическую основу под предпринимаемые многими странами усилия по созданию систем мониторинга состояния приземного воздуха в городах и разработке мер

по повышению его качества. Большое внимание стало уделяться сокращению выбросов в атмосферу CO и NO_x. Электростанции в промышленно развитых странах стали активнее переводиться на использование в качестве топлива природного газа вместо угля. Начали разрабатываться новые модели автомобилей с пониженным выбросом химически активных соединений. Предпринимаемые действия привели к положительным результатам, особенно в странах, расположенных в низких широтах (Мексика, Япония и др.), где при высоком уровне УФ освещенности фотохимические процессы с образованием токсичных веществ идут наиболее активно [64]. Аналогичные действия предпринимались и в России [65], причем наиболее активно в последние два десятилетия. В крупнейшем в Европе Московском мегаполисе оптимизация городской инфраструктуры в эти годы способствовала снижению приземной концентрации CO, NO, SO₂ со скоростью 3.6, 5.0 и 3.7% в год соответственно [66].

Высокая чувствительность озонового слоя к антропогенному воздействию и угроза возможного его разрушения мобилизовали научное сообщество на проведение широкомасштабных исследований в области химии атмосферы. В 1974 г. одновременно были опубликованы четыре статьи [67–70], в которых представлен хлорный каталитический цикл гибели озона в стратосфере:



Основное различие между статьями состоит в предполагаемых источниках хлора в стратосфере. Если Р. Столярски и Р. Цицерон [67] считали источником вулканические извержения (впоследствии этот источник оказался незначительным), то М. Молина и Ф. Роуланд [68] и П.Й. Крутцен [69] связывали появление хлора в стратосфере с фотолизом фреонов 11 и 12, которые в большом количестве производятся промышленностью разных стран. По расчетам П.Й. Крутцена снижение концентрации озона на высоте 40 км могло достичь в будущем 40%, если уровень производства фреонов в мире сохранится на уровне 1970 г. Подобную оценку разрушения озона к 1980–1985 гг. приводят Р. Цицерон и др. [70] при условии, что выбросы хлорфторуглеродов будут продолжаться на уровне 1970 г.

Вскоре были определены и другие устойчивые в нижней атмосфере галогенсодержащие соединения, которые, попадая в стратосферу, подвергаются фотолизу, выделяя активные хлор, бром или йод. Возможность того, что деятельность человека может, даже непреднамеренно, вызывать катастрофические изменения состояния окружа-

ющей среды, всколыхнула общество, и началась компания за запрещение производства и выбросов в атмосферу озоноразрушающих веществ. Результаты теоретических исследований надо было подтвердить наблюдениями. Были организованы и проведены многочисленные национальные и международные эксперименты. Быстро развивались методы и средства измерений содержания примесей в атмосфере, численное моделирование. Значительный вклад в исследования состава атмосферы внес ИФА РАН. Измерения содержания в атмосфере озона, окислов азота, аэрозолей и других компонентов проводились на научных станциях Института, с борта самолетов-лабораторий, вертолетов, научных судов. Выполненные эксперименты на космической станции “Салют” выявили наличие характерной слоистой вертикальной структуры в глобальном распределении озона и аэрозоля [71–74]. По результатам наземных и самолетных наблюдений получены количественные оценки влияния внутренних гравитационных волн, солнечных затмений и атмосферной циркуляции и различных типов антропогенного воздействия на содержание в атмосфере озона, NO_2 и других примесей [75–77].

В 1985 г. Дж. Фарман [78] сообщил об аномалии озона над Антарктидой, которая получила название “озоновой дыры”. Совместными усилиями многих ученых был установлен механизм ее формирования. Ключевым звеном в процессе изучения этого явления являлось объяснение П.И. Крутценом конкурирующей роли в разрушении озона двух каталитических циклов – азотного и хлорного. В нормальных условиях взаимодействие между NO_x и ClO_x приводит к образованию нейтрального соединения ClONO_2 и HCl . Хлор присутствует в атмосфере, в основном, в составе этих соединений. Крутцен предположил, что NO_x может выходить из газовой фазы. Лабораторные опыты показали, что при температуре ниже 200 К могут образовываться твердые частицы тригидрата азотной кислоты [79]. В Антарктической стратосфере зимой температура опускается до 190 К. Радикалы NO_x переходят в твердое вещество, резко усиливая озоноразрушающее действие хлорного каталитического цикла. Предложенный П.И. Крутценом механизм лежит в основе описания процессов, которые происходят в Антарктической, а в последнее время и в Арктической, стратосфере.

П.И. КРУТЦЕН И Г.С. ГОЛИЦЫН: ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ЭКСПЕДИЦИИ

Получая важные результаты в области теоретической химии и численного моделирования, П.И. Крутцен всегда стремился найти им подтверждение путем проведения натурных наблюдений. Им были предложены и реализованы много-

численные полевые эксперименты по измерению состава атмосферы с использованием различных средств, включая спутники, суда, поезда и самолеты. В какой-то момент П.И. Крутцен, заметивший, что ученые-атмосферщики много путешествуют, предложил брать с собой специальные канистры, чтобы собирать пробы воздуха во время путешествий, особенно во время поездок на конференции. Немногие смогли сделать это из-за практических проблем с объяснением таможенникам на границе, но, тем не менее, была собрана важная информация о некоторых региональных особенностях состава приземного воздуха и содержания в нем парниковых газов. Интересно, что на такую инициативу откликнулись молодые ученые разных специальностей, что способствовало постановке новых задач и оказало влияние на быстрое развитие науки о химии атмосферы.

Высокая потребность в данных наблюдений химически и радиационно активных газовых примесей и аэрозолей в атмосфере способствовала расширению мировой сети наблюдательных станций. Под влиянием обозначенных П.И. Крутценом проблем были созданы фоновые высокогорные станции, такие, например, как Юнгфрауйох (Альпы) и Кисловодск (Северный Кавказ). В то же время оставалась непокрытой сетевыми измерениями территория мирового океана. Необходимо было активизировать проведение экспедиций, в основном международных, с использованием корабельных, воздушных и спутниковых средств. Однако стоимость специализированных платформ для проведения регулярных измерений состава атмосферы была слишком высокой. В этой связи П.И. Крутцен ориентировал коллег на использование грузовых и пассажирских транспортных средств. Хорошим примером такого подхода к измерениям на протяженных маршрутах с использованием судоходства стал проект INDOEX (Indian Ocean Experiment, 1998–1999 гг.) [35]. П.И. Крутцен и его коллеги убедили руководителей компании Narag Lloyd установить несколько газоанализаторов на грузовом судне, которое доставляло автомобили из Гамбурга в Японию и из Японии в Гамбург. Было много трудностей, связанных с расположением приборов, автоматизацией измерений, сменой экипажей, но, в конце концов, система заработала и продолжала работать в течение многих лет, собирая ценные данные об озоне в приводном слое атмосферы [80]. Насколько нам известно, столь длительная эксплуатация измерительной системы является большой редкостью.

Одним из наиболее успешных экспериментов в области атмосферных исследований оказался проект TROICA (Transcontinental Observations Into the Chemistry of the Atmosphere) [81–85]. Проект был инициирован П.И. Крутценом и Г.С. Голицыным и состоял в наблюдениях состава и состояния атмосферы на трансконтинентальных

железнодорожных маршрутах от Москвы до Владивостока и от Мурманска до Сочи и Кисловодска. Специально созданная лаборатория состояла из двух вагонов и проводила в автоматизированном режиме измерения большого числа газовых примесей (40–60 соединений), аэрозолей, радиационных и метеорологических характеристик атмосферы. Многочисленные результаты TROICA и сделанные научные открытия были широко опубликованы и внесли существенный вклад в понимание процессов, происходящих в континентальной атмосфере. В этом номере журнала результатам экспериментов TROICA посвящена отдельная статья.

Использование гражданских самолетов всегда было в центре внимания у специалистов по химии атмосферы. Быстрое перемещение в свободной атмосфере на большие расстояния делает самолеты удобной платформой для наблюдений. Однако, до извержения вулкана Пинатубо в 1991 году, когда авиакомпании столкнулись с тяжелыми последствиями для самолетов при прохождении облаков вулканической пыли, авиакомпании не являлись естественными партнерами ученых. Но необходимость контроля содержания аэрозоля в атмосфере, а также проблема воздействия авиации на озоновый слой и климат заметно подогрели интерес авиакомпаний к мониторингу состава атмосферы.

Действительно, появилось несколько проектов, некоторые из них работают и сейчас. Длительный проект CONTRAIL был осуществлен в Японии [86]. Исполнялась простая концепция, которая заключалась в сборе проб воздуха в полете без измерений на борту самолета. После приземления в аэропорту заполненные колбы анализировались в лаборатории. Такая методика измерений оказалась очень надежной, было собрано множество данных о концентрации углекислого газа на крейсерской высоте. Позже количество отслеживаемых газовых примесей было увеличено. Аналогичный проект действует на Тайване с 2007 года, предоставляя ценные данные о выбросах CO₂ над Тихим океаном (<https://calec.china-airlines.com/csr/environment/en/charity-plan-1.html>).

П.Й. Крутцен со своими сотрудниками в конце 1980-х годов намеревались получить и оборудовать самолет Airbus для атмосферных исследований и предприняли для этого значительные усилия. Однако, столкнувшись с проблемами совместного с другими странами ЕС использования крупных инвестиций, от самолета-лаборатории отказались. Вместо этого в рамках финансирования, предоставленного ЕС, родился финансируемый Францией проект MOZAIC (Measurement of Ozone and Water Vapor by Airbus in service Aircraft), который дал важные сведения о распределении озона и водя-

ного пара в верхней тропосфере [87]. Позднее этот проект был трансформирован в своего преемника IAGOS (In-Service Aircraft for a Global Observing System), ориентированного на исследование увеличения концентрации озона в тропосфере [88].

Разработанный и реализованный П.Й. Крутценом с сотрудниками проект CARIBIC (Civil Aircraft for the Regular Investigation of the atmosphere) использовал совершенно другую концепцию, а именно – измерения содержания примесей в атмосфере проводились с помощью приборов, заключенных в специальный контейнер. Измерения концентрации парниковых газов, озона, окиси углерода, окислов азота и некоторых других газов велись в реальном времени. Контейнер весом 1.5 т загружается в грузовой отсек самолета и подключается к специальному воздухозаборнику, который является частью конструкции самолета. Оборудование работает автоматически и снимается после 2–6 последовательных полетов. В лаборатории данные считываются и образцы анализируются. Полеты самолета с измерениями совершаются примерно раз в месяц в течение многих лет. Они дали огромный объем информации о глобальных особенностях состава верхней тропосферы и нижней стратосферы [89].

Как отмечает Г.С. Голицын в своей лекции на Общем собрании РАН самым крупным и длительным проектом Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН является проект TROICA (Tropospheric Investigation of Chemistry of Atmosphere), инициированный им совместно с П.Й. Крутценом четверть века назад и осуществлявшимся около двух десятилетий. В феврале 1995 г. будущие лауреаты премии Ломоносова договорились начать совместные измерения малых примесей в атмосфере, и уже в ноябре того же года первый специально оборудованный вагон прошел от Москвы до Хабаровска и Владивостока [90, 91]. Интересно отметить, такое звучное русское имя TROICA для этого проекта предложил именно профессор П.Й. Крутцен.

Проект получил мировую известность, и в нем участвовали ученые Германии, Австрии, США, Финляндии. Зарубежные специалисты предполагали, что повышение содержания метана в атмосфере связано с утечками из российских газопроводов, но изотопный анализ углерода тех мест, где наблюдался избыток метана, показал, что его происхождение в основном биогенное. За организацию работ по этому проекту Н.Ф. Еланский получил в США звание героя окружающей среды (Hero of Environment). Такое звание NOAA (Национальное управление по океанам и атмосфере США) присуждает в год одному человеку или одной группе ученых. Подробное описание работ, выполненных в рамках этого уникального проекта, приведено в

статье Н.Ф. Еланского, Г.С. Голицына, П.Й. Крутцена и др. “Наблюдения состава атмосферы над Россией: эксперименты TROICA”, публикуемой в этом номере журнала.

“СУМЕРКИ В ПОЛДЕНЬ” И “ЯДЕРНАЯ ЗИМА”

После II Мировой войны в 60-е и 70-е годы XX века в мире стало быстро нарастать количество и мощность ядерных зарядов, и возник вопрос об оценке воздействия взрывов большой мощности на крупные города и промышленные центры, а также возможных глобальных долговременных последствий казавшейся в то время вполне реальной ядерной войны.

В 1975 году Национальная академия наук США выпустила отчет “Долговременные широкомасштабные эффекты множественных ядерных взрывов”, где отмечалась возможность глобальных радиоактивных осадков, которые могут вызвать гибель десятков миллионов человек от рака и генетических изменений, а ионизирующая радиация может непредсказуемым образом изменить экологическую ситуацию на Земле. В докладе также обсуждалось уменьшение озонового слоя, которое в то время оценивалось в 30–70%, что может оказать существенное воздействие на стратосферу и вызвать за счет увеличения потока солнечного излучения незначительное воздействие на температуру у поверхности Земли. В 1980 году генеральному секретарю ООН был представлен доклад “Всеобъемлющее исследование, касающееся ядерного оружия”, подготовленный группой экспертов, в которую входили ученые, дипломаты и военные специалисты из многих стран мира.

Настоящий прорыв в исследовании возможных последствий ядерной войны случился в начале 80-х годов. В 1982 году международное научное сообщество было взбудоражено появлением специального выпуска шведского журнала АМБИО, вышедшего под броским заголовком “Nuclear War: The Aftermath” (Ядерная война: последствия). Особое внимание ученых во всем мире привлекла опубликованная в этом выпуске статья П.Й. Крутцена и Дж. Биркса “Атмосфера после ядерной войны: сумерки в полдень” [92]. Эта выдающаяся статья вызвала бум исследований гипотезы “ядерной зимы”, и первой публикацией на эту тему стала работа американских ученых [93].

Уже в 1983–85 гг. в работах американских и советских ученых были сформулированы основные положения гипотезы ядерной зимы и оценены климатические последствия возможного крупномасштабного ядерного обмена. Появились обзорные статьи о возможных атмосферных и климатических последствиях ядерной войны, где отмечалось, что до сих пор при рассмотрении атмосферных последствий основное внимание

уделялось озоновому слою атмосферы. Теперь началось изучение и других характеристик атмосферы, которые могут изменяться после взрывов и пожаров. Но картина здесь еще далеко не ясна. Ядерные взрывы и пожары также заметно изменят альбедо поверхности суши, привнесут в атмосферу огромное количество веществ, существенно повлияв, таким образом, на ее оптические свойства. Это, в свою очередь, приведет к изменениям атмосферной циркуляции, а затем — из-за большого числа прямых и обратных связей в земной климатической системе — к климатическим эффектам в региональном и в глобальном масштабах.

В эти годы стало понятно, что атмосферные процессы и связи, возникающие в результате ядерного обмена “нельзя рассматривать изолированно, изучены они недостаточно и могут давать эффекты различных знаков и интенсивности. Для оценки суммарного эффекта следовало бы использовать численные модели циркуляции атмосферы с учетом ее химических, оптических и других измерений”.

Поскольку основным механизмом формирования феномена “ядерной зимы” являются массовые пожары, то в ИФА АН СССР в 80-е годы XX века были развернуты работы по исследованию возможных атмосферных и климатических последствий полномасштабного ядерного конфликта и поиску природных аналогов этой климатической катастрофы.

На базе пионерских работ Г.С. Голицына по динамике планетных атмосфер и работы А.С. Гинзбурга о радиационном режиме атмосферы запыленной атмосферы Марса во время великого противостояния удалось построить простую аналитическую модель катастрофического похолодания на Земле в гипотетическом случае возникновения крупномасштабных пожаров от массового применения ядерного оружия [94, 95]. Эта модель оказалась впоследствии применима для оценки температурных эффектов крупных лесных и нефтяных пожаров.

Итоги первых лет исследования феномена “ядерной зимы” подведены в ряде международных отчетов, подготовленных при непосредственном участии Г.С. Голицына [96, 97]. Важно отметить, что в последние годы снова возрос интерес к феномену “ядерной зимы” в связи с описанием существенных изменений климата Земли.

В области поиска природных аналогов “ядерной зимы” особо интересным и важным стал анализ крупнейших природных пожаров, оптических свойств и температурных эффектов их дыма. Активное участие П.Й. Крутцена и Г.С. Голицына в оценке возможных атмосферных и климатических последствий ядерной войны в некотором смысле стало предтечей их идеи проекта TROICA.

АНТРОПОЦЕН

Свою лекцию для Общего собрания РАН профессор П.Й. Крутцен озаглавил “We live in the Anthropocene, so will our grandchildren”, что можно перевести как “Мы живем в Антропоцене, как и наши внуки будут”. Как подчеркивает П.Й. Крутцен, в основе концепции Антропоцена лежит сформулированная В.И. Вернадским концепция Ноосферы. Академик Вернадский еще в 1938 году писал о научной мысли как о геологической силе. В своих работах П.Й. Крутцен пишет, что советские ученые, похоже, использовали термин “Антропоцен” еще в 1960-х годах для обозначения четвертичного периода, самого последнего геологического периода. Американский эколог Ю.Ф. Штермер начал использовать термин “Антропоцен” в 1980-е годы в современном смысле.

Однако широкую популярность этот термин приобрел только в XXI веке после публикации в 2000 году статьи Нобелевского лауреата профессора П.Й. Крутцена и Ю.Ф. Штермера [98], в который был сформулирован тезис, что влияние человека на атмосферу Земли в последние столетия стало настолько значительным, что оно определяет новую геологическую эпоху. Интересно отметить, что хотя эта статья опубликована в *IGBP Newsletters* и не включена список рецензируемых публикация П.Й. Крутцена, она считается ключевой в большинстве последующих публикаций, посвященных дискуссии о том, наступила ли уже геологическая эпоха антропоцена и если да, то когда она началась.

Антропоцен — это предполагаемая геологическая эпоха, со времени начала значительного антропогенного воздействия на геологию и экосистемы Земли, включая антропогенное изменение климата, но не ограничиваясь им. Были предложены различные даты начала антропоцена: от начала сельскохозяйственной революции 12–15 тысяч лет назад до 60-х годов XX века [99–102].

По состоянию на февраль 2020 года Международная комиссия по стратиграфии (ICS) и Международный союз геологических наук (IUGS) еще официально не одобрили этот термин в качестве признанного подразделения геологического времени, хотя предложения для определения эпохи антропоцена в геологической шкале времени были представлены Международному геологическому конгрессу в 2016 году. Процесс ратификации продолжается, хотя дата начала эпохи антропоцена еще не определена окончательно. Сегодня наиболее предпочтительным временем начала эпохи антропоцена считается середина XX века — время взрыва первой атомной бомбы и заключения Договора о частичном запрещении ядерных испытаний. Роль Нобелевского лауреата профессора П.Й. Крутцена в этом процессе трудно переоценить.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем номере журнала собраны статьи, посвященные развитию идей академика Г.С. Голицына и профессора П.Й. Крутцена, в том числе публикации с участием самих лауреатов и авторов, приглашенных лауреатами и редколлегией журнала [103–112].

В статье Н.Ф. Еланского и др., как уже отмечалось выше, подводятся итоги проведения уникальных экспериментов по наблюдениям состава и состояния атмосферы над Россией, выполненные в рамках проекта TROICA, в котором участвовали ученые и техники из разных стран. В статье обсуждаются опубликованные ранее наиболее важные результаты и новые, полученные в последнее время, что позволяет сформировать целостную картину пространственного распределения и временной изменчивости состава атмосферы над обширной территорией Северной Евразии.

Статья В.А. Семенова “Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи” представляет собой обзор некоторых значимых достижений в исследованиях изменений климата в Арктике. В ней указаны механизмы положительных обратных связей, усиливающих климатические изменения в высоких широтах Северного полушария, и формулируются наиболее важные актуальные проблемы, требующие решения.

В работе Н.В. Вазаевой, О.Г. Чхетиани, М.В. Курганского и М.А. Каллистратовой “Спиральность в атмосферном пограничном слое” отмечается, что спиральность присуща множеству циркуляционных движений и структур в атмосферном пограничном слое, и поэтому фактор спиральности требует корректного учета при построении атмосферных моделей. В статье проводятся качественное и количественное сравнения измеренных значений и результатов численного моделирования с помощью квазидвумерной модели и мезомасштабной атмосферной негидростатической модели WRF-ARW.

Работа А.С. Гинзбурга и С.А. Докукина “Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM)” развивает идеи П.Й. Крутцена [63] о роли теплового загрязнения в формировании и динамике городского острова тепла.

Статья Г.С. Голицына, Ю.И. Троицкой и Г.А. Байдакова “Анализ частотных спектров морского волнения и законов разгона с точки зрения вероятностных законов А.Н. Колмогорова и его школы” анализирует данные натуральных измерений параметров поверхностного волнения, выполненные при различной степени его развития. В работе с использованием вероятностных законов А.Н. Колмогорова и его школы предлагается ин-

терпретация особенностей диффузии примеси в поле поверхностных волн на различных разгонах.

В работе Е.Б. Гледзера “О термодинамике колмогоровского скейлинга в турбулентности” модельные уравнения баланса энергии для турбулентности записаны в форме первого начала термодинамики и показано, что для распределения энергии по закону Колмогорова–Обухова энтропия принимает такую же форму, как для идеального газа в термодинамике. В статье предложена возможная формула для температуры турбулентности, учитывающая основной механизм передачи энергии в турбулентности – гидродинамическую неустойчивость.

Статья А.Н. Груздева и А.С. Елохова “Изменения общего содержания и вертикального распределения NO_2 по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА РАН” анализирует вариации и тренды общего содержания и вертикального распределения NO_2 за 30 лет наблюдений в западном Подмоскowie. В ней получены сезонно-зависимые оценки трендов NO_2 .

В статье А.Е. Алояна, А.Н. Ермакова и В.О. Артюняна “Моделирование влияния ионов на динамику формирования атмосферного аэрозоля” описана новая численная модель переноса и трансформации в атмосфере газовых и аэрозольных примесей с учетом процессов фотохимии, нуклеации с участием нейтральных молекул и ионов, а также конденсации/испарения и коагуляции. Результаты моделирования указывают на значимую роль процесса ионной нуклеации в формировании атмосферного аэрозоля. Показано, что наряду с уровнем ионизации воздуха ключевыми факторами, определяющими динамику ионной нуклеации, являются также температура и относительная влажность.

Работа И.К. Ларина “О влиянии глобального потепления на озоновый слой и УФ-В излучение” посвящена влиянию глобального потепления на озоновый слой и интенсивность приземного околополуденного УФ-В излучения. В ней приводятся результаты расчетов изменений в озоновом слое к 2100 году, полученных с помощью одномерной фотохимической модели и интерактивной двумерной фотохимической модели.

В статье В.С. Ракитина, Н.Ф. Еланского, А.И. Скорохода и др. “Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода в атмосфере московского мегаполиса” исследована долговременная изменчивость общего содержания (ОС) СО и метеопараметров, получены характеристики накопления окиси углерода в штилевые дни в пограничном слое атмосферы, получены оценки интегральных эмиссий Москвы, согласующиеся с литературными данными. В работе представлены результаты комплексного анализа измерений

общего содержания окиси углерода СО на станциях ИФА РАН в Москве и Московской области, данных автоматизированных станций сети Мосэкомониторинг с привлечением результатов спутникового мониторинга и информации о параметрах пограничного слоя атмосферы в Москве и окружающих регионах.

В статье Виrolайнен Я.А., Полякова А.В., Тимофеева Ю.М. “Анализ изменчивости стратосферных газов по данным наземных спектрометрических наблюдений в районе Санкт-Петербурга” анализируются озоновые аномалии, возникающие в зимне-весенний период в Северном полушарии, которые в последние десятилетия все чаще наблюдаются не только в полярных, но и средних приполярных широтах, в том числе вблизи городских агломераций таких как Санкт-Петербург. В работе показана роль температурного и динамического состояний стратосферы и общего содержания фтористого водорода (HF) в формировании условий химического разрушения озона.

В заключение приведем цитату из лекции профессора П.Й. Крутцена, подготовленной для Общего собрания РАН: “*Наше любопытство и стремление понять все, что нас окружает, включая нас самих, заставляет науку опрокидывать каждый камень*”. Это замечательное описание научного подхода к окружающему миру полностью отражает творчество лауреатов Большой золотой медали имени М.В. Ломоносова РАН и является путеводным примером для нынешних и будущих исследователей. Научные доклады лауреатов Большой золотой медали Российской академии наук имени М.В. Ломоносова 2019 года были представлены на общем собрании членов РАН 9 декабря 2020 года и опубликованы в журнале “Вестник Российской академии наук” [113, 114].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голицын Г.С. Статистика и динамика природных процессов и явлений: методы, инструментарий, результаты. М.: URSS, 2013. 344 с.
2. P.J. Crutzen, H.G. Brauch (eds.). Paul J. Crutzen: A Pioneer on Atmospheric Chemistry and Climate Change in the Anthropocene, Nobel Laureates 50. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27460-7_2
3. Голицын Г.С. Введение в динамику планетных атмосфер. М.: Гидрометеоиздат, 1973. 104 с.
4. Голицын Г.С. Исследование конвекции с геофизическими приложениями и аналогиями. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 56 с.
5. Будыко М.И., Голицын Г.С., Израэль Ю.А. Глобальные климатические катастрофы. М.: Гидрометеоиздат, 1986. 159 с.
6. Voubnov B.M., Golitsyn G.S. Convection in Rotating Fluids. Dordrecht: Cluwer Acad. Publ. 1995. 232 p.
7. Голицын Г.С. Природные процессы и явления: волны, планеты, конвекция, климат, статистика. М.: Физматлит, 2004. 344 с.

8. Голицын Г.С. Микро- и макромиры и гармония. Библиотечка Квант. № 107. Приложение к журналу “Квант”. № 3. 2008. 204 с.
9. *Crutzen P.J., Hahn J. Schwarzer Himmel* (Черное небо: влияние ядерной войны на климат и глобальную окружающую среду). S. Fischer Verlag. 1985. 240 p.
10. *Pittock A.B., Ackerman T.P., Crutzen P.J., MacCracken M.C., Shapiro C.S., Turco R.P.* Environmental Consequences of Nuclear War, SCOPE 28, Volume I: Physical and Atmospheric Effects. Chichester: Wiley. 1986. 359 p.
11. *Crutzen P.J., Müller M.* Das Ende des Blauen Planeten? (Конец голубой планеты?) С.Н. Beck Verlag. 1989. 271 p.
12. *Graedel T.E., Crutzen P.J.* Atmospheric Change: An Earth System Perspective. New York: W.H. Freeman. 1993. 446 p.
13. *Graedel T.E., Crutzen P.J.* Chemie der Atmosphäre. Bedeutung für Klima und Umwelt (Химия атмосферы. Значение для климата и окружающей среды). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag. 1994. 511 p.
14. *Graedel T.E., Crutzen P.J.* Atmosphere, Climate, and Change. New York: W.H. Freeman. 1995. 208 p.
15. *P.J. Crutzen, V. Ramanathan (Eds.)* Clouds, Chemistry and Climate. Nato ASI Subseries I. 1996.
16. *Crutzen P.J., Golitsyn G.S.* Linkages Between Global Warming, Ozone Depletion and Other Aspects of Global Environmental Change. II: *I.M. Mintzer* (Ed.): Confronting Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. 1992. P. 15–32.
17. Голицын Г.С. Скопления галактик, параметры подобия и соотношения между их измеряемыми характеристиками // УФН. 2015. Т. 185. № 12. С. 1323–1332.
18. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Генчен Ван, Пусай Ван, Джола А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракитин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В. Исследование загрязнения атмосферы Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолям // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 8.
19. *Alexandrov G.A., Golitsyn G.S.* Biological age from the viewpoint of the thermodynamic theory of ecological systems // Ecological Modelling. 2015. Т. 313. С. 103–108.
20. *Скоруход А.И., Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Томпсон Р.Л., Новигатский А.Н., Голицын Г.С.* Атмосферный метан и его изотопный состав над морями российской арктики по результатам судовых измерений летом и осенью 2015 года // ДАН. 2016. Т. 470. № 5. С. 580–584.
21. *Чуличков А.И., Андреев М.С., Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Медведев А.П., Постыляков О.В.* Об определении нижней границы облачности по цифровой стереосъемке с поверхности Земли // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 11. С. 980–986.
22. *Боровский А.Н., Арабов А.Я., Голицын Г.С., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Мохов И.И., Савиных В.В., Сенник И.А., Тимажев А.В.* Вариации общего содержания диоксида азота в атмосфере на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 29–44.
23. Голицын Г.С. Жизнь в науке об окружающем мире // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 5–15.
24. Голицын Г.С. Результаты анализа скоплений галактик с позиций теории подобия и размерности // ДАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 164.
25. Голицын Г.С. Поправки и дополнения к статье Г.С. Голицына “Скопления галактик, параметры подобия и соотношения между их измеряемыми характеристиками” (УФН. 2015. Т. 185. № 12. С. 1323–1332) // УФН. 2016. Т. 186. № 2. С. 220.
26. *Golitsyn G.S.* On the cumulative distribution of the lithospheric plates by their areas // Russian J. of Earth Sciences // 2017. Т. 17. № 5. С. ES5001.
27. *Баренблатт Г.И., Голицын Г.С.* Критерии подобия и масштабы для кристаллов // Физическая мезомеханика. 2017. Т. 20. № 1. С. 116–119.
28. Голицын Г.С. Теория подобия и размерности для галактик: объяснение давно известных результатов наблюдений // ДАН. 2017. Т. 475. № 4. С. 395–399.
29. Голицын Г.С. Законы случайных блужданий А.Н. Колмогорова – основа для описания большинства природных явлений // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 3. С. 260–267.
30. Голицын Г.С. Законы случайных блужданий А.Н. Колмогорова 1934 года // Метеорология и гидрология. 2018. № 3. С. 5–15.
31. *Slyunyaev N.N., Mareev E.A., Rakov V.A., Golitsyn G.S.* Statistical distributions of lightning peak currents: why do they appear to be lognormal? // J. Geophys. Res.: Atmos. 2018. Т. 123. № 10. С. 5070–5089.
32. *Wang P., Wang G., Ran L., Wang T., Elansky N.F., Golitsyn G.S., Rakiitin V.S., Shtabkin Y., Skorokhod A.I., Grechko E.I., Fokeeva E.V., Safronov A.N., Timofeev Y.M., Makarova M.V.* Long-term trends of carbon monoxide total columnar amount in urban areas and background regions: ground- and satellite-based spectroscopic measurements // Adv. Atmos. Sci. 2018. Т. 35. № 7. С. 785–795.
33. Голицын Г.С. Степенные распределения площадей разливов в гидрологии // Водные ресурсы. 2018. Т. 45. № 4. С. 380–384.
34. *Горчаков Г., Голицын Г.С., Ситнов С., Карнов А.В., Горчакова И.А., Гушин Р., Даценко О.* Крупномасштабные дымки Евразии в июле 2016 г. // ДАН. 2018. Т. 482. № 2. С. 209–212.
35. *Ермоленко С.И., Кукушкина А.Е., Голицын Г.С., Швед Г.М.* Связь длиннопериодных собственных колебаний земли с процессами в атмосфере // ДАН. 2018. Т. 481. № 3. С. 315–319.
36. *Руткевич П.Б., Голицын Г.С., Руткевич Б.П., Шелехов А.П.* Развитие подоблачного слоя над морем при вторжении холодного воздуха // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 4. С. 386–395.
37. *Руткевич П.Б., Голицын Г.С., Руткевич Б.П.* Формирование облачности над океаном при вторжении холодного воздуха // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54. № 5. С. 516–524.
38. *Александров Г.А., Гинзбург А.С., Голицын Г.С.* Влияние североатлантического колебания на континентальность московского климата // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 5. С. 32–38.
39. *Гледзер Е.Б., Голицын Г.С.* Структура рельефа и гравитационного поля планет: правило Каулы – следствие законов теории вероятностей А.Н. Колмогорова

- рова и его школы // ДАН. 2019. Т. 485. № 4. С. 493–496.
40. Голицын Г.С., Васильев А.А. Изменение климата и его влияние на частоту экстремальных гидрометеорологических явлений // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 9–12.
 41. Копейкин В.М., Голицын Г.С., Гэнчэнь В., Пуцай В., Пономарева Т.Я. Вариации концентрации сажи в мегаполисах Пекине и Москве // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32. № 6. С. 453–457.
 42. Голицын Г.С., Фортус М.И. Случайные процессы со стационарными приращениями и композитные спектры // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56. № 4. С. 418–427.
 43. Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Под ред. Г.С. Голицына, И.И. Мохова, С.Н. Куличкова, М.В. Курганского, И.А. Репиной, О.Г. Чхетиани. М.: Физматкнига, 2018. 586 с.
 44. Chapman S.A Theory of Upper Atmospheric Ozone // In: Memoirs of the Royal Meteorological Society. 1930. V. 3. P. 103–125.
 45. Гуцин Г.П. Исследования атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 267 с.
 46. Хргиан А.Х., Еланский Н.Ф., Березин В.М., Иозенас В.А., Краснополский В.А. Некоторые результаты наблюдения озона со спутника 17–18 июня 1966 г. // Метеорология и гидрология. 1973. № 4. С. 3–12.
 47. Хргиан А.Х. Физика атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 291 с.
 48. Еланский Н.Ф. О механизме воздействия струйного течения на озоновый слой // Изв. АН СССР. ФАО. 1975. Т. 11. № 9. С. 916–925.
 49. Bates D.R., Nicolet M. The Photochemistry of Atmospheric Water Vapour // JGR. 1950. V. 55. P. 301.
 50. McGrath W.D., Norrish R.G.W. Studies of the Reaction of Excited Oxygen Atoms and Molecules Produced in the Flash Photolysis of Ozone // Proceedings of the Royal Society of London. A. 1960. V. 254. P. 317.
 51. Norrish R.G.W., Wayne R.P. The Photolysis of Ozone by Ultraviolet Radiation. The Photolysis of Ozone Mixed with Certain Hydrogen-Containing Substances // Proceedings of the Royal Society of London. A. 1965. V. 288. P. 361.
 52. Hampson J. Chemiluminescent Emission Observed in the Stratosphere and Mesosphere. Les problèmes météorologiques de la stratosphère et de la mesosphère. Paris: Presses Universitaires de France. 1965. P. 393.
 53. Hunt B.G. Photochemistry of Ozone in a Moist Atmosphere // JGR. 1966. V. 71. P. 1385.
 54. Crutzen P.J. Determination of Parameters Appearing in the “Dry” and “Wet” Photochemical Theories for Ozone in the Stratosphere // Tellus. 1969. V. 21. P. 368–388.
 55. Crutzen, P.J. The Influence of Nitrogen Oxides on the Atmospheric Ozone Content // QJRM. 1970. V. 96. P. 320–325.
 56. SCEPT (Study on Critical Environmental Problems). 1970. Man’s Impact on the Global Environment. Assessment and Recommendations for Action. Cambridge: The MIT Press.
 57. Crutzen, P.J. Ozone Production Rates in an Oxygen-Hydrogen-Nitrogen Oxide Atmosphere // JGR. 1971. V. 76. P. 7311.
 58. Еланский Н.Ф., Трутце Ю.Л. Некоторые особенности распределения общего содержания озона и NO₂ в атмосфере по наблюдениям с самолета // Изв. АН СССР. ФАО. 1979. Т. 15. № 1. С. 119–121.
 59. 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. Т. 18. С. 667–669.
 60. Груздев А.Н., Еланский Н.Ф. Наблюдения озона в области горных подветренных волн // Изв. АН СССР. ФАО. 1984. Т. 20. С. 705–714.
 61. Johnston H.S. Atmospheric Ozone // The Annual Review of Physical Chemistry. 1992. V. 43. P. 1–31.
 62. Levy III H., Normal Atmosphere: Large Radical and Formaldehyde Concentrations Predicted // Science. 1971. V. 173. P. 141–143.
 63. Crutzen P.J., Zimmermann P.H. The Changing Photochemistry of the Troposphere // Tellus. 1991. V. 43 AB. P. 136–151.
 64. Crutzen P.J. New Directions: The Growing Urban Heat and Pollution “Island” Effect—Impact on Chemistry and Climate // Atmos. Environ. 2004. V. 38. P. 3539–3540.
 65. Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В. Воздух городов и его изменения. СПб: Астерион, 2008. 254 с.
 66. Elansky N.F., Ponomarev N.A., Verevkin Y.M. Air quality and pollutant emissions in the Moscow megacity in 2005–2014 // Atmos. Environ. 2018. V. 175. 2. P. 54–64. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.057>
 67. Stolarski R.S., Cicerone R.J. Stratospheric Chlorine: A possible Sink for Ozone // Canadian J. Chemistry. 1974. V. 52. P. 1610–1615.
 68. Molina M.J., Rowland F.S. Stratospheric Sink of Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-Catalyzed Destruction of Ozone // Nature. 1974. V. 249. P. 810–814.
 69. Crutzen P.J. Estimates of Possible Future Ozone Reductions from Continued Use of Fluorochloromethanes (CF₂Cl₂ CFC13) // Geophys. Res. Lett. 1974. V. 1. P. 205–?.
 70. Cicerone R.J., Stolarski R.S., Walters S. Stratospheric Ozone Destruction by Man-Made Chlorofluoromethanes // Science. 1974. V. 185. P. 1165–1167.
 71. Grechko G.M., Elansky N.F., Plotkin M.E., Postylyakov O.V. The ozone and aerosol fine structure experiment: observing the fine structure of ozone and aerosol distribution in the atmosphere from the “Salyut-7” orbiter. 1. Introduction and the occultation experiment // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 18647–18653.
 72. Elansky N.F., Plotkin M.E., Postylyakov O.V., Ukhinov S.A. The ozone and aerosol fine structure experiment: observing the fine structure of ozone and aerosol distribution in the atmosphere from the “Salyut-7” orbiter. 2. Formation of the Earth’s twilight limb coloration and radiance: Numerical calculations // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. № D10. P. 18653–18660.
 73. Elansky N.F., Grechko G.M., Plotkin M.E., Postylyakov O.V. The ozone and aerosol fine structure experiment: observing the fine structure of ozone and aerosol distribution in the atmosphere from the “Salyut-7” orbiter. 3. Experimental Results // J. Geophys. Res. 1991. V. 96. P. 18661–18670.
 74. Grechko G.M., Elansky N.F., Plotkin M.E., Postylyakov O.V., Ukhinov S.A. The OZAFS experiment in observing the fine structure of the ozone and aerosol dis-

- tribution in the atmosphere // *Adv. Space Res.* 1992. V. 12. P. 157–160.
75. Груздев А.Н., Еланский Н.Ф. Оценка воздействия горных подветренных волн на содержание малых газовых примесей в тропосфере // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1984. Т. 20. С. 558–565.
 76. Груздев А.Н., Еланский Н.Ф. Изменение содержания газовых примесей в стратосфере во время солнечного затмения // *Изв. АН СССР. ФАО.* 1982. № 5. С. 541–544.
 77. Elansky N.F., Investigation of mesoscale dynamics processes over mountain region by deformation of ozone field // In: “Ozone in the atmosphere”. Ed by A.D. Bojkov and P. Fabian. Hampton, Virginia USA: A. DEERAK Publ. 1989. P. 494–497.
 78. Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D. Large Losses of Total Ozone in Antarctica Reveal Seasonal ClO_x/NO_x Interaction // *Nature.* 1985. V. 315. P. 201.
 79. Crutzen P.J., Arnold F., Nitric Acid Cloud Formation in the Cold Antarctic Stratosphere: A Major Cause for the Springtime Ozone Hole // *Nature.* 1986. V. 324. P. 651.
 80. Lelieveld J., van Aardenne J., Fischer H., de Reus M., Williams J., Winkler P. Increasing Ozone over the Atlantic Ocean // *Science.* 2004. V. 304. P. 1483–1487.
 81. 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., Elokhov A.S., Golitsyn G.S., Gorchakov G.I., Granberg I.G., Grisenko A.M., Holzinger R., Hurst D.F., Ageev 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., Postulyakov 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. 2009. Atmospheric composition observations over Northern Eurasia using the mobile laboratory: TROICA experiment. M.: ISTC publisher. 73 p.
 82. Крутцен П.Й., Голицын Г.С., Еланский Н.Ф., Brenninkmeijer C.A.M., Шарффе Д., Беликов И.Б., Елохов А.С. Наблюдения малых примесей в атмосфере над территорией России с использованием железнодорожного вагона-лаборатории // *ДАН.* 1996. Т. 350. № 6. С. 819–823
 83. Crutzen P.J., Elansky N.F., Hahn M., Golitsyn G.S., Brenninkmeijer C.A.M., Scharffe D.H., Belikov I.B., Maiss M., Bergamaschi P., Röckmann T., Grisenko A.M., Sevostyanov, V.M. Trace Gas Measurements Between Moscow and Vladivostok Using the Trans-Siberian Railroad // *J. Atmosph. Chem.* 1998. V. 29. P. 179–194.
 84. 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. P. D14303 (1 of 9).
<https://doi.org/10.1029/2004JD004633>
 85. Oberlander E.A., Brenninkmeijer C.A.M., Crutzen P.J., Lelieveld J., Elansky N.F. Why Not Take the Train? Trans-Siberian Atmospheric Chemistry Observations across Central and East Asia // *EOS, Transactions, American Geophysical Union.* 2002. V. 83. № 45. P. 509. P. 515–516.
 86. Taku Umezawa, Hidekazu Matsueda, Yousuke Sawa, Yosuke Niwa, Toshinobu Machida, Lingxi Zhou. Seasonal evaluation of tropospheric CO₂ over the Asia-Pacific region observed by the CONTRAIL commercial airliner measurements // *Atmos. Chem. Phys.* 2018. V. 18. P. 14851–14866.
 87. Marengo Alain, Valerie Thouret, Philippe Nedelec, Herman Smit, Manfred Helten, Dieter Kley, Fernand Karcher, Pascal Simon, Kathy Law, John Pyle, Georg Poschmann, Rainer von Wrede, Chris Hume, and Tim Cook Measurement of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZAIC airborne program, An overview // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. D19. № 25. P. 631–642.
 88. Gaudel Audrey, Owen R. Cooper, Kai-Lan Chang, Ilann Bourgeois I, Jerry R. Ziemke, Sarah A. Strode Aircraft observations since the 1990s reveal increases of tropospheric ozone at multiple locations across the Northern Hemisphere // *Science Advances.* 2020. V. 6. № 34.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aba8272>
 89. Brenninkmeijer C.A.M., Crutzen P., Boumard F., Dauer T., Dix B., Ebinghaus R., Filippi D., Fischer H., Franke H., Frieß U., Heintzenberg J., Helleis F., Hermann M., Kock H.H., Koepfel C., Lelieveld J., Leuenberger M., Martinsson B.G., Miemczyk S., Moret H.P., Nguyen H.N., Nyfeler P., Oram D., O’Sullivan D., Penkett S., Platt U., Pucek M., Ramonet M., Randa B., Reichelt M., Rheel T.S., Rohwer J., Rosenfeld K., Scharffe D., Schlager H., Schumann U., Stelm F., Sprung D., Stock P., Thaler R., Valentino F., van Velthoven P., Waibel A., Wandel A., Waschitschek K., Wiedensohler A., Xueref-Remy I., Zahn A., Zech U., Ziereis H. Civil Aircraft for the regular investigation of the atmosphere based on an instrumented container: The new CARIBIC system // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7. P. 4953–4976.
 90. Crutzen P.J., Golitsyn G.S., Elanskii N.F., Brenninkmeijer C.A.M., Scharffe D., Belikov I.B., Elokhov A.S. Observations of Minor Impurities in the Atmosphere over the Russian Territory with the Application of a Railroad Laboratory Car // *Transaction of the Russian Academy of Sciences/Earth Science Sections.* 1996. № 351. P. 1289–1293 (Translated from *Dokl. Akademii Nauk.* 1996. № 350. P. 819–823.).
 91. 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. 107.
 92. Crutzen P.J., Birks J. The Atmosphere After a Nuclear War: Twilight at noon // *Ambio.* 1982. V. 12. 114.
 93. Turco R.P., Toon O.B., Ackerman T.P., Pollack J.B., Sagan C. Nuclear winter: Global consequences of multiple nuclear explosions // *Science.* 1983. V. 222. P. 1283–1292.
 94. Гинзбург А.С. О радиационном режиме поверхности и запыленной атмосферы Марса // *ДАН СССР.* 1973. Т. 208. № 2. С. 295–298.
 95. Golitsyn G.S., Ginsburg A.S. Comparative estimates of climatic consequences of Martian dust storms and a possible nuclear war // *Tellus.* 1985. V. 37B. № 3. P. 173–181.

96. *Golitsyn G.S., Philips N.A.* Possible climate consequences of a major nuclear war. Report to XXXVII WMO Executive Council. 1985. 54 p.
97. *MacCracken M., Golitsyn G.* Atmospheric and climatic consequences of nuclear war: results of recent research // Geneva. 1988. WMO. WCP-140. 60 p.
98. *Crutzen P.J., Stoermer E.F.* The “Anthropocene” // IGBP Newsletter. 2000. № 41. P. 17–18.
99. *Crutzen P.J.* Dowsing the Human Volcano // Nature. 2000. V. 407. P. 674–675.
100. *Crutzen P.J., Ramanathan V.* Atmospheric Chemistry and Climate in the Anthropocene. Where are we Heading? // In: *H.J. Schellnhuber, P.J. Crutzen, W.C. Clark, M. Claussen, H. Held* (Eds.): Earth System Analysis for Sustainability. Dahlem Workshop Report. 2004. Cambridge, USA: MIT Press. P. 265–292.
101. *Crutzen P.J.* The Anthropocene: When Humankind overrides Nature // In: *F. Schmidt, N. Nuttall* (Eds.): Contributions towards a sustainable world — in dialogue with Klaus Töpfer 2014. München: Oekom Verlag. P. 21–27.
102. *Zalasiewicz J., Water C.N., Williams M., Barnosky A.D., Cearreta A., Crutzen P., Ellis E., Ellis M.A., Fairchild I.J., Grinevald J., Haff P.K., Hajdas I., Leinfelder R., McNeill J., Odada E.O., Poirier C., Richter D., Steffen W., Summerhayes C., Syvitski J.P.M., Vidas D., Waple M., Wing S.L., Wolfe A.P., Zhisheng A., Oreskes N.* When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal // Quaternary International. 2015. 383. P. 196–203.
103. *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. 57. Наст. вып.
104. *Семенов В.А.* Современные исследования климата Арктики: прогресс, смена концепций, актуальные задачи // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
105. *Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О.* Моделирование влияния ионов на динамику формирования атмосферного аэрозоля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
106. *Ларин И.К.* О влиянии глобального потепления на озоновый слой и УФ-В излучение // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
107. *Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Джолола А.В., Ракитина А.В., Шилкин А.В., Кириллова Н.С., Казаков А.В.* Долговременные тенденции общего содержания окиси углерода в атмосфере московского мегаполиса // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
108. *Вазеева Н.В., Чхетиани О.Г., Курганский М.В., Каллистратова М.А.* Спиральность в атмосферном пограничном слое // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
109. *Гинзбург А.С., Докукин С.А.* Влияние теплового загрязнения атмосферы на климат города (оценки с помощью модели COSMO-CLM) // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
110. *Гледзер Е.Б.* О термодинамике колмогоровского скейлинга в турбулентности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
111. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Изменения общего содержания и вертикального распределения NO₂ по результатам 30-летних измерений на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
112. *Виротайнен Я.А., Поляков А.В., Тимофеев Ю.М.* Анализ изменчивости стратосферных газов по данным наземных спектрометрических наблюдений в районе Санкт-Петербурга // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2021. Т. 57. Наст. вып.
113. *Голицын Г.С.* Путь в науке об окружающем мире // Вестн. РАН. 2021. Т. 91. № 1.
114. *Крутцен П.Й.* Наши внуки, как и мы сегодня, будут жить в антропоцене // Вестн. РАН. 2021. Т. 91. № 1.

Double Portrait: G.S. Golitsyn and P.J. Crutzen Contribution to the Physics and Chemistry of the Atmosphere Study

К. А. М. Brenninkmeijer¹, А. S. Ginzburg^{2,*}, N. F. Elansky², and I. I. Mokhov^{2,3}

¹Max Plank Institute of Chemistry, Hahn-Meitner-Weg, 1, Mainz, 55128 Germany

²Obukhov Institute of Atmospheric Physics of RAS, Pyzhevsky lane, 3, Moscow, 119017 Russia

³Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: gin@ifaran.ru

Introductory article to a special issue of the journal “Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics” dedicated to the awarding of a Lomonosov large gold medal of the Russian Academy of Sciences, 2019. Academician Georgy Golitsyn awarded “for outstanding contribution to the study of atmospheric physics of the earth and planets and the development of the theory of climate and its changes”. The foreign member of RAS, Professor Paul Joseph Crutzen awarded “for outstanding contribution to the chemistry of the atmosphere and assess the role and biogeochemical cycles in the climate formation”. This issue of the journal includes: an article highlighting the contribution of G.S. Golitsyn and P.J. Crutzen to the study of physics and chemistry of the atmosphere, climate, and biogeochemical cycles, as well as articles written for this special issue with the participation or recommendation of the laureates.

Keywords: atmospheric physics and chemistry, biogeochemical cycles, climate and there changes