

РОССИЙСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ АТМОСФЕРНОЙ ХИМИИ В 2015–2018 гг.

© 2019 г. И. К. Ларин

*Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского
центра химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук
119334, Москва, Ленинский пр., 38, корп. 2
E-mail: ilarin@yandex.ru*

Поступила в редакцию 04.07.2019 г.
Принята к печати 07.08.2019 г.

Представлен краткий обзор работ российских ученых в области атмосферной химии в 2015–2018 гг., включая работы по химии тропосферы, химии озонового слоя, работы по изучению гетерофазных процессов, а также работы, связанные с химическими аспектами климата и его изменения. Обзор подготовлен в Комиссии по атмосферной химии Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета. Отчет был рассмотрен и одобрен на XXVII Генеральной ассамблее Международного геодезического и геофизического союза (IUGG)¹.

Ключевые слова: химические процессы, гетерофазные процессы, тропосфера, стратосфера, климат.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-351555666-78>

Отметим прежде всего, что в 2016 г. вышла работа «Российские исследования в области атмосферной химии в 2011–2014 гг.» [1].

1. ХИМИЯ ТРОПОСФЕРЫ

Одним из важных направлений исследований в этой области является изучение элементарных химических реакций атмосферного значения, данные о которых затем используются в математических моделях атмосферы. В этой связи следует назвать работу [2], в которой с использованием метода резонансной флуоресценции для регистрации активных химических реагентов в проточном реакторе были измерены константы скорости гомогенной реакции атомов хлора с CH_3Br в диапазоне температур 298–358 К: $k_{\text{Cl}+\text{CH}_3\text{Br}} = (1.3 \pm 0.1) \times 10^{-11} \exp(-976 \pm 91)/RT$ молекула⁻¹см³с⁻¹. В другой работе [3] была тем же методом в диапазоне температур 295–368 К измерена константа скорости реакции атомов хлора с CHF_2Br : $k_{\text{Cl}+\text{CHF}_2\text{Br}} = (4.23 \pm 0.13) \cdot 10^{-12} \exp(-15.56 \pm 1.58)/RT$ молекула⁻¹см³с⁻¹ ($R = 8.314472\text{E-}03$ кДж/моль К). Наряду с методом резонансной флуоресценции, для изучения химических реакций использу-

ется масс-спектральная техника. В работе [4] с использованием этого метода была впервые рассчитана константа скорости реакции дихлоруксусной кислоты с атомарным фтором. В работе [5] методом конкурирующих реакций с применением молекулярно-пучковой масс-спектрометрии была изучена кинетика реакции атомарного фтора с пиридином и 2-фторэтанолом. Впервые была определена константа скорости реакции пиридина с атомарным фтором, которая составила $k = (8.0 \pm 3.0) \cdot 10^{-10}$ см³ молекул⁻¹с⁻¹. Были установлены основные продукты этой реакции: пиридинил и фторпиридин. В этом ряду следует упомянуть также работу [6], в которой изучалась трансформация галогенсодержащих кислот в атмосфере. Новый метод, разработанный в ИХФ РАН для анализа этих соединений, позволил выявить детальный механизм участия этих кислот в образовании и росте аэрозолей, а также, в частности, рассчитать время жизни дифторуксусной кислоты для разных условий. В этом ряду можно также упомянуть работу [7], в которой на основании лабораторных экспериментов была предложена качественная схема химических процессов, описывающая образование газовых и аэрозольных продуктов

¹ Russian National Report/Meteorology and Atmospheric Sciences. 2015–2018 / Eds: I.I. Mokhov, A.A. Krivolitsky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press, 2019. – 332 p.

фотолиза фурфурала. Помимо лабораторных измерений химические реакции изучаются и расчетным путем. Так, в работе [8] с помощью квантовомеханических расчетов была изучена реакция дикарбона в состоянии $C_2(X^1 \Sigma_G^+)$ с молекулой азота в газовой фазе при различной ориентации реагирующих молекул в комплексе столкновения: линейной, перпендикулярной и параллельной. Последняя представляет наибольший интерес, поскольку при этом система с пороговой энергией, составляющей 37.2 ккал/моль, проходит через состояние, которое превращается в сильно колебательно-возбужденный дициан. Последний за времена порядка 10^{-13} – 10^{-14} с распадается на два радикала CN. Значительное место среди работ по изучению тропосферы занимают работы, связанные с моделированием тропосферных процессов. Так, в работе [9] представлены результаты построения статистических моделей временных рядов атмосферных примесей (взвешенных частиц размером менее 10 мкм (PM10), CO и NO₂) для сети автоматизированных станций контроля загрязнения атмосферы Московского мегаполиса. В другой работе [10] приводятся результаты моделирования переноса ⁸⁵Kr в атмосфере в условиях эксперимента ACURATE с помощью трех транспортных моделей — FLEXPART, HYSPLIT и модели из кода НОСТРАДАМУС. Было показано, что с помощью всех трех лагранжевых моделей возможно качественно описать поля концентраций ⁸⁵Kr в эксперименте ACURATE. В работе [11] представлены сравнения модельных прогнозов химическими транспортными моделями CHIMERE и COSMO-RU7-ART загрязнения приземного воздуха с данными измерений в Москве в 2015 г. Показано, что модели, как правило, несколько занижают значения натуральных данных. Назовем также работу [12], в которой проведено сравнение результатов численного моделирования с помощью модели WRF-CHEM и данных самолетного зондирования. Важные сведения о химических процессах, протекающих в загрязненном городском воздухе, могут быть получены из данных о химическом составе и кислотности городских осадков. Такие данные (наряду с другими атмосферными характеристиками) приводятся в работах сотрудников Метеорологической обсерватории Географического факультета МГУ, представленных в монографии [13]. Отметим также работу [14], в которой анализ осадков в Москве проводится с использованием изотопов. Значительное число работ в области тропосферной химии было посвящено мониторингу загрязня-

ющих веществ, включая продукты лесных пожаров, аэрозолей, а также малых составляющих тропосферы, таких, как озон, окись и двуокись углерода, двуокись азота и др. [15–46]. В качестве «новинки» в области теории укажем на работу [47], авторы которой попытались установить связь между снежным покровом и приземным озоном, хотя никаких физических причин для такой связи не существует.

2. ГЕТЕРОФАЗНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Гетерофазные процессы имеют большое значение для понимания озоносферной химии. Напомним, что именно эти процессы сыграли решающую роль в истощении озонового слоя в конце 20-го столетия и в образовании Антарктической и Арктической озоновых дыр. В последние годы в этой области были получены новые важные результаты. Так, в работе [48] описывается новая математическая модель глобального переноса многокомпонентных газовых примесей и аэрозолей и формирования полярных стратосферных облаков (PCO) в обоих полушариях в условиях местной полярной зимы. На поверхности и в объеме частиц PCO протекают гетерогенные химические реакции, влияющие на газовый состав атмосферы, в частности, на содержание хлор- и азотсодержащих соединений, участвующих в разрушении озона. В работе [49] выявлено нахождение в приземном воздухе двух групп аэрозольных частиц: «карбонатных», включающих карбонаты щелочных (Na⁺, K⁺) и щелочноземельных (Mg²⁺, Ca²⁺) металлов, и «аммиачных», включающих в основном аммонийные ионы (NH₄⁺) и анионы свободных атмосферных кислот (HNO₃, H₂SO₄). Полученные при этом результаты показывают, что характер распределения этих анионов по группам частиц чувствителен к вариациям относительной влажности воздуха (RH). По этим данным сообщается о канале формирования в карбонатных частицах сульфатных анионов, возникающих в результате прямого окисления захватываемого из воздуха диоксида серы. В [50] рассмотрены причины появления в московских осадках больших концентраций гидрокарбонатов, существенно превосходящих равновесный уровень. В работе [51] изучались продукты мономолекулярного распада поверхностного комплекса, образующегося при захвате NO₂ покрытием из метановой сажи. В качестве газофазных продуктов захвата зарегистрированы NO и HONO. При этом продукт NO количественно соответствует половине израсходованного реагента NO₂.

В работе [52] исследован захват N_2O_5 на сажевом покрытии при $T = 255$ и 298 К с использованием термостатированного проточного реактора с подвижной вставкой и нанесенной на нее сажей, а также масс-спектрометра с ионизацией низковольтными электронами. В работе [53] с использованием ранее построенной авторами математической модели глобального переноса многокомпонентных газовых примесей и аэрозолей выполнены расчеты концентраций в атмосфере сульфатных аэрозолей и частиц полярных стратосферных облаков применительно к обоим полушариям в зимнее время. Найдено, что ключевым фактором, определяющим тип формирующихся аэрозольных частиц в атмосфере, является распределение в ней температуры. В работе [54] рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с нуклеацией, а также с процессами роста и диссоциации газовых гидратов. Наряду с математическими моделями, применяемыми для описания указанных процессов, обсуждены результаты их экспериментальных исследований. Отдельные разделы посвящены эффекту самоконсервации газовых гидратов, проявлению в гидратообразовании эффекта «памяти» воды, разработке катализаторов процесса гидратообразования и исследованиям влияния на него веществ, растворенных в водной фазе. В работе [55] рассмотрены данные природных и лабораторных наблюдений аэрозольных частиц в нижней стратосфере. Обсуждается микрофизика их формирования, механизмы гетерогенных химических реакций с участием резервуарных газов (HCl , $ClONO_2$ и др.), а также их кинетические характеристики. В работе [56] рассматривается процесс зарождения льда в атмосфере, происходящий в результате гетерогенной конденсации водяного пара в неоднородностях поверхности аэрозольных частиц и последующей гетерогенной кристаллизации скоплений переохлажденной воды. Установлено, что размеры, строение и состав аэрозольных частиц определяют термический режим кристаллизации. В работе [57] рассматриваются задачи, связанные с оценкой влияния сульфатных аэрозолей на формирование облачности над морем в средней тропосфере, а также участие этих частиц в образовании полярных стратосферных облаков в нижней стратосфере. Показано, что без учета влияния сульфатных аэрозолей формирование облачности над морем в средней и верхней тропосфере затруднено. Приводятся результаты численных расчетов распределения в нижней стратосфере концентраций газообразных азотной и серной кислот, а также массо-

вых концентраций этих компонентов в частицах полярных стратосферных облаков. В [58] приводятся описание алгоритма и результаты расчетов динамики разрушения стратосферного озона в средних широтах с учетом механизма галогенной активации и частиц слоя Юнге. Выполнена оценка вклада гетерофазных реакций в истощение озонового слоя и обоснована необходимость их учета при разработке прогнозов восстановления озонового слоя в XXI веке. В [59] рассматриваются два типа полярных стратосферных облаков (ПСО): тип Ia — образование частиц тригидрата азотной кислоты (NAT), и тип Ib — образование частиц переохлажденного трехкомпонентного раствора $H_2SO_4/HNO_3/H_2O$ и частиц STS (supercooled ternary solutions). Для их моделирования предложены новые уравнения, описывающие изменчивость компонентов, находящихся в газовой и конденсированной фазах с учетом их термодинамических свойств. Формирование ПСО рассматривается совместно с формированием сульфатных аэрозолей в верхней тропосфере и нижней стратосфере с учетом химических и кинетических процессов трансформации (фотохимия, нуклеация, конденсация/испарение и коагуляция). В [60] рассмотрен процесс образования аэрозольных частиц из пересыщенного пара в предположении, что стабильные зародыши новой фазы содержат две (димеры) или три (тримеры) молекулы конденсирующегося пара. В [61] разработан полуэмпирический метод анализа механизма гетерогенных реакций, основанный на кинетической модели Ленгмюра–Хиншельвуда, модифицированной приближением двухэкспоненциального разложения первого порядка. Метод оказался весьма полезным при описании кинетики фотокаталитического окисления в воздухе на частицах TiO_2 широкого круга веществ: кетонов, фосфорорганических соединений, алкилсульфидов, хлорированных углеводородов. В [62] рассмотрено «старение» дымового аэрозоля при дальнем переносе, обусловленное частично и гетерофазными процессами. В [63] путем численного моделирования показано, что интенсивность образования вторичного органического аэрозоля (ВОА) в дымовых шлейфах от растительных и торфяных пожаров при реальных условиях может существенно зависеть от величины аэрозольной оптической толщи, которая определяет скорость процессов фотодиссоциации и концентрацию гидроксила, от которой, в свою очередь, зависит скорость генерации ВОА в результате окисления полуволетучих органических соединений.

3. ХИМИЯ ОЗОНОВОГО СЛОЯ

В этой области в 2015–2018 гг. был получен ряд новых результатов, как в области теории озонового слоя, так и в области наблюдений за его эволюцией, связанной с восстановлением общего содержания озона после его уменьшения в конце прошлого века под действием антропогенных факторов. В области теории отметим монографию [64], в которой детально рассмотрены озоносферные механизмы и процессы, включая каталитические циклы разрушения стратосферного озона, образование Антарктической и Арктической озоновых дыр, влияние на озоносферу галактических космических лучей и других естественных и антропогенных факторов. В [65] рассчитаны временные границы восстановления озонового слоя в широтных зонах 0° – 85° , 0° – 30° , 30° – 60° и 60° – 85° Северного полушария в XXI веке. Расчеты выполнены с помощью интерактивной химико-динамически-радиативной двумерной модели средней атмосферы Socrates (высоты 0–120 км). В качестве начальных данных для расчетов использовались прогностические сценарии IPCC (Межправительственного комитета по изменению климата) концентраций парниковых газов RCP 4.5 и RCP 6.0. Показано, в частности, что после восстановления озоновый слой будет продолжать расти и к концу XXI века достигнет стационарного уровня, превосходящего «невозмущенный» дофреоновый уровень, что представляет не меньшую экологическую угрозу, чем истощение озонового слоя в конце XX века. В [66] рассмотрен химический состав средней атмосферы, включая тропосферу, стратосферу и мезосферу, и его изменение под действием главным образом антропогенных факторов в XXI веке. В [67] рассмотрены основные процессы озоносферы, включая процессы галогенной активации. В [68] рассматриваются современные варианты теории цепных процессов разрушения озонового слоя, включая авторский вариант (подробнее см. в [61]). В [69] с помощью предложенного ранее алгоритма расчета лимитирующих стадий продолжения цепи в озоносферных циклах разрушения стратосферного озона рассчитан вклад O_x , HO_x , NO_x , ClO_x и BrO_x циклов в гибель озона в конце XXI века на широте 50° с.ш. в различные сезоны года. В [70] впервые сделана корректная оценка атмосферного времени жизни нечетного кислорода с учетом его гибели в известных каталитических циклах. Показано, что когда время жизни нечетного кислорода становится сравнимым или больше времени турбулентного переноса по

высоте, его следует заменить на комбинированное время жизни, учитывающее действие как фотохимических, так и динамических факторов. В [71] рассмотрены нерешенные проблемы химии средней атмосферы, к которым относятся вопросы, связанные с атмосферным временем жизни семейства нечетного кислорода O_x и его компонент, вопросы, связанные с временем жизни компонент O_x , HO_x , NO_x , ClO_x семейств, с расчетом скорости гибели нечетного кислорода в каталитических циклах O_x , HO_x , NO_x , ClO_x и BrO_x и длины цепи этих циклов. В связи с постепенным ослаблением действия на озоновый слой антропогенных факторов все большее начинают привлекать факторы естественные. Так, в [72] смоделировано влияние планетарных волн на устойчивость циркумполярного вихря, температуру полярной стратосферы и содержание озона и других газов с использованием глобальной химико-климатической модели нижней и средней атмосферы. В [73] представлены результаты численного фотохимического моделирования воздействия на озоносферу полярных областей Земли наиболее мощных протонных вспышек на Солнце в 23-м цикле активности. Была обнаружена сезонная зависимость отклика озона на солнечные протонные события, а также впервые получен эффект долговременных последствий, продолжительность которого составила около года. В [74] рассмотрены закономерности внезапных стратосферных потеплений (ВСП) и их влияние на содержание NO_2 и O_3 . Показано, что ВСП могут приводить к значительным аномалиям общего содержания NO_2 , озона и стратосферной температуры, причем знак аномалий может быть различным в зависимости от положения пункта наблюдений относительно стратосферного вихря. В [75, 76] сообщаются дополнительные подробности относительно аномалий NO_2 и O_3 , связанных с внезапными стратосферными потеплениями в 2010 и 2011 гг. В [77] рассматривается влияние высыпающихся энергичных частиц на озоновый слой и климат. Показано, что основное влияние на долговременную изменчивость озонового слоя оказывают энергичные электроны. Аналогичным образом в [78] описывается увеличение атмосферного содержания NO_2 после солнечного протонного события в октябре 2003 г. В [79] рассмотрены актуальные проблемы изучения ультрафиолетовой радиации и озонового слоя. Показано, в частности, что рекордная за все годы наблюдений аномалия озонового слоя в Арктике весной 2011 г., когда повышенные уровни УФР были отмечены даже в Москве, подтвердила необходимость

дальнейших исследований в данной области. В [80] изучалось влияние на озоносферу солнечной активности. Результаты модельных расчетов показали, что, помимо увеличения спектрального потока в полосах поглощения молекулярного кислорода, ведущего к росту содержания озона, значимыми для состава и температуры атмосферы являются и изменения потока на больших длинах волн. Большой интерес представляют работы, в которых демонстрируется прямое воздействие динамических факторов на озоновый слой. К таким работам относится публикация [81], в которой демонстрируется образование озоновой мини-дыры в результате продолжительного блокирующего действия антициклона над Европейской территорией России летом 2010 г. В аналогичной работе [82] проанализированы аномалии озона, водяного пара и температуры, связанные с относительно коротким весенним событием атмосферного блокирования и аномально продолжительным летним блоком над Европейской Россией в 2010 г. В [83] обсуждается связь водяного пара и озона в атмосфере над Европейской частью России с Североатлантическим колебанием летом 2010 г. В [84] рассматривается влияние квазидвухлетней цикличности экваториального стратосферного ветра на общее содержание NO_2 , озона и стратосферной температуры. Значительный интерес представляют также многолетние наблюдения за атмосферными компонентами. Укажем в связи с этим на работу [85], в которой сообщаются данные наблюдений за общим содержанием NO_2 , ведущихся с 1990 г., причем эти данные получают из измерений вертикального профиля NO_2 , который больше нигде в мире не измеряется. В заключение обзора работ по влиянию естественных факторов на озоносферу приведем работу [86], в которой дается описание численной глобальной фотохимической модели CHARM (CHemical Atmospheric Research Model) и приводятся результаты трехмерного численного моделирования распределений озона и других малых газовых составляющих атмосферы Земли в диапазоне высот 0–90 км и их изменения под действием потоков УФ радиации Солнца, а также обусловленного разрушением озона в полярных областях частицами высоких энергий космического происхождения. Последняя работа из этой серии — это работа [87] о стратосферно-тропосферном обмене, который также можно отнести к естественным факторам. Что касаясь антропогенных факторов, то, как сообщается в [88], рост содержания хлорводорода (производного от антропогенных хлорфторуглеродов) в настоящее время прекращается.

4. ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

Работы в этой области были связаны с теорией климата, прогнозированием климатических изменений, мониторингом парниковых газов и сопутствующими вопросами. Одним из важных вопросов теории климата является вопрос о причинах его изменений. В работе [89] обсуждается вопрос о наблюдавшемся в плейстоцене запаздывании изменений содержания CO_2 от изменений приповерхностной температуры, что считается аргументом против антропогенных причин современного глобального потепления. В [89] показано, что изменения содержания CO_2 могут как запаздывать, так и опережать изменения температуры, что определяется типом внешнего воздействия на систему, и что эти подвижки не противоречат выводу о ключевой роли антропогенного фактора в современных изменениях климата. В [90] высказывается несколько другая точка зрения, согласно которой изменения температуры с начала 1970-х до середины 1990-х гг. и сменившую их паузу в потеплении, почти полностью объясняются вариациями крупномасштабной циркуляции, описываемыми индексами Северо-Атлантического, Тихоокеанско-Североамериканского и Скандинавского колебаний. Еще одна точка зрения — о возможном влиянии на климат прошлого солнечной активности — высказывается в работе [91] (вывод был сделан по изменению ширины ежегодного прироста колец ископаемых окаменевших деревьев). Эта мысль развивается в [92] (для последних 2000 лет) и [93] (для XX века). В [94] авторы сравнивали вариации концентрации углекислого газа в атмосфере и средней глобальной приземной температуры воздуха за последние 50 лет. Оказалось, что в междугодовых масштабах вариации CO_2 отставали от соответствующих вариаций температуры, однако в 1980–1990-х гг. лидировал CO_2 , что авторы сочли признаком того, что в это время на климат влиял человек. На самом деле из такого анализа нельзя сделать никаких выводов, имея в виду, что время релаксации климатической системы составляет многие сотни лет. В [95] анализируется изменчивость зональных трендов приповерхностной температуры для периода 1979–2012 гг. с использованием ансамблевых расчетов с моделью общей циркуляции атмосферы (МОЦА) с идентичными предписанными условиями на нижней границе атмосферы и различными начальными условиями. В [96] представлены результаты, характе-

ризирующие способность современных глобальных и региональных климатических моделей не только оценивать риск общих тенденций изменений, но и предсказывать качественно новые региональные эффекты. В [97] анализируются возможности ансамбля современных глобальных климатических моделей при воспроизведении наблюдаемой эволюции приземной температуры на суше в Арктике, включая пространственное соответствие модельных расчетов и данных наблюдений. В [98] изменения температуры поверхности Земли в 1850–2014 гг. анализируются с помощью семи исторических расчетов, выполненных с климатической моделью INM-CM5. Замедление глобального потепления в 2000–2014 гг. удастся воспроизвести благодаря более точному заданию сценария изменения солнечной постоянной в протоколах CMIP6. В [99] рассматриваются наиболее вероятные эндогенные (внутренние) и экзогенные (внешние) факторы, которые могут вызвать изменения климата Земли с периодами от нескольких до сотен тысяч лет. В [100] приводятся результаты применения непараметрического метода регрессионного анализа (квантильной регрессии) для оценки изменений приземной температуры воздуха в разных климатически квазиоднородных регионах России на основе данных суточного разрешения 517 метеорологических станций. В [101] на основе палеоклиматических данных разработаны проекции естественных трендов глобальной среднегодовой температуры и количества осадков до 3000 г. В [102] методами спектрального анализа проведено разложение пяти палеоклиматических реконструкций для внетропической зоны Северного полушария на квазипериодические составляющие. На основе выявленных квазипериодичностей построен климатический прогноз для внетропической зоны Северного полушария, показывающий, что наблюдающийся в настоящее время теплый климат в целом сохранится на протяжении 500 лет, но в XXII в. начнет приобретать явно выраженную тенденцию к постепенному похолоданию. В [103] с помощью однослойной радиационной модели атмосферы с использованием данных архива SRB (Surface Radiation Budget) за 1984–2007 гг. получена оценка изменения распределения температуры земной поверхности при повсеместном увеличении альбедо атмосферы на 1%: в среднем по земному шару температура поверхности уменьшается на 1 °С. В [104] проведены сопоставления спектров уходящего теплового ИК-излучения, измеренных фурье-спектрометром SI-1 в 1977 и 1979 гг. со

спутников Метеор-28 и -29, с данными расчетов на основе современного радиационного кода LBLRTM и данных радиозондирования атмосферы. Средние разности между измерениями и расчетами в большинстве случаев не превышают 2 мВт/(м² × ср × см⁻¹) в спектральной области 660–1600 см⁻¹. В [105] описана новая версия программного обеспечения FIRE-ARMS, дополненная векторной моделью переноса излучения VLIDORT, которая позволяет моделировать уходящее в космос тепловое ИК-излучение Земли и отраженное от поверхности солнечное излучение в ближнем ИК-диапазоне с учетом многократного рассеяния света. В [106] рассматриваются перспективные оценки изменений климата в Российских регионах. Задача решается путем проведения массовых (50 членов) ансамблевых расчетов с использованием высоко разрешающей (25 км по горизонтали) системы моделей климата, разработанных в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. В [107] рассмотрены возможные подходы к преодолению климатического кризиса — быстрое уменьшение антропогенных выбросов CO₂, изъятие из атмосферы избыточного количества CO₂ и целенаправленное изменение баланса приходящего солнечного излучения. Делается вывод о том, что начиная с середины XXI в. человечество будет вынуждено использовать все три подхода к недопущению опасного превышения средней глобальной температуры. В [108] утверждается, что с помощью современных климатических моделей нельзя разрабатывать сценарии изменения климата на следующие десятилетия. Предлагается сценарий, основанный на реальных особенностях вариаций глобальной температуры, согласно которому в ближайшие десятилетия не только сохранится продолжающаяся уже 15 лет стабилизация температуры, но и возможно некоторое похолодание. В [109] рассматривается вопрос о влиянии выбросов российской гражданской авиации в 2000–2012 гг. на климат. Показано, что влияние незначительно. В [110] обсуждается воздействие вулканической деятельности на температуру приземного слоя воздуха. Показано, что вулканические извержения могут приводить к глобальному понижению температуры приземного воздуха на 0.5–20 °С в год, последующий за извержением, следствием чего может явиться длительное похолодание. В [111] обсуждаются региональные аспекты моделирования климата и его изменений, а в [112] — аномалии и тенденции современных изменений климата. Значительное внимание в последние годы уделялось мониторингу парниковых газов

и аэрозолей, а также изучению газовых гидратов и их свойств. Эти данные представлены в работах [113–129]. Закончим этот обзор работой [130], в которой приводятся количественные оценки вклада радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции в тренды глобальной приповерхностной температуры и приповерхностной температуры в разных широтных зонах.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Грант № 19-05-00080.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин И.К. Российские исследования в области атмосферной химии в 2011–2014 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 2. С. 167–174.
2. Ларин И.К., Спасский А.И., Трофимова Е.М., Прончева Н.Г. Измерение константы скорости реакции атомов хлора с CH_3Br в диапазоне температур 298–358 К методом резонансной флуоресценции атомов хлора // Кинетика и катализ. 2018. Т. 59. № 1. С. 15–21.
3. Ларин И.К., Спасский А.И., Трофимова Е.М., Прончева Н.Г. Измерение константы скорости реакции атомов хлора с CHF_2Br методом резонансной флуоресценции атомов хлора // Кинетика и катализ. 2016. Т. 57. № 3. С. 308–312.
4. Васильев Е.С., Сыромятников А.Г., Шартава Д.К., Карпов Г.В., Морозов И.И. Масс-спектрометрическое исследование дихлоруксусной кислоты // Химическая безопасность. 2018. Т. 2. № 1. С. 206–212.
5. Волков Н.Д., Морозов И.И., Васильев Е.С., Кинетика реакции атомов фтора с пиридином // Химическая безопасность. 2018. Т. 2. № 2. С. 151–157.
6. Морозов И.И., Васильев Е.С., Карпов Г.В., Бутковская Н.И. Трансформация галогенсодержащих молекул в атмосфере // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 года. М.: Физматкнига. 2018. С. 153.
7. Дубцов С.Н., Дульцева Г.Г., Плохотниченко М.Е., Кошляков П.В., Кобзева Т.В. Исследование кинетики фотолиза и фотохимического образования фурфурала // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 476–480.
8. Колбановский Ю.А., Борисов Ю.А. Квантовомеханические расчеты механизма реакции дикарбена $\text{C}_2(\text{X}^1 \Sigma_g^+)$ с молекулярным азотом // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 2. С. 9–15.
9. Демченко П.Ф., Гинзбург А.С., Александров Г.Г., Вересков А.И., Горчаков Г.И., Завлишин Н.Н., Захарова П.В., Лезина Е.А., Юдин Н.И. Статистическое моделирование среднесуточных концентраций загрязняющих веществ в атмосфере Московского мегаполиса методом множественной регрессии // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 31–43.
10. Рубинштейн К.Г., Сафронов А.Н., Припачкин Д.А., Игнатов Р.Ю., Емелина С.В., Набокова Е.В., Курбатова М.М., Благодатских Д.В., Арутюнян Р.В., Сороковикова О.С., Семенов В.Н. Сравнение результатов моделей переноса ^{85}Kr в атмосфере с данными натурального эксперимента ACURATE // Метеорология и гидрология. 2017. № 3. С. 41–57.
11. Шалыгина И.Ю., Нахаев М.И., Кузнецова И.Н., Березин Е.В., Коновалов И.Б., Блинов Д.В., Кирсанов А.А. Сравнение рассчитанных с помощью химических транспортных моделей приземных концентраций загрязняющих веществ с данными измерений в Московском регионе // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 53–59.
12. Антохин П.Н., Горчаков А.В., Колкер А.Б., Пененко А.В. Сравнение результатов расчетов химико-транспортной модели WRF-CHEM с данными самолетных измерений в г. Норильск // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 4. С. 282–287.
13. Локощенко М.А., Жданова Е.Ю., Богданович А.Ю., Горбаренко Е.В., Перепёлкин В.Г. и др. Эколого-климатические характеристики атмосферы Москвы в 2017 г. по данным Метеорологической обсерватории МГУ им. М.В. Ломоносова под ред. М.А. Локощенко. М.: МАКС Пресс, 2018. С. 239.
14. Чиждова Ю.Н., Еремина И.Д., Буданцева Н.А., Суркова Г.В., Васильчук Ю.К. Использование изотопного метода при оценке атмосферных осадков Москвы // Гигиена и санитария. 2017. Т. 9. № 8. С. 737–743.
15. Еланский Н.Ф., Кузнецов Р.Д., Веревкин Я.М., Пономарев Н.А., Ракитин В.С., Шилкин А.В., Семутникова Е.Г., Захарова П.В. Временная изменчивость концентрации загрязняющих примесей в атмосфере Москвы и оценка их эмиссий // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г., М.: Физматкнига, 2018, с. 10.
16. Горчаков Г.И., Семутникова Е.Г., Карпов А.В., Кузнецов Г.А. Московская дымная мгла в октябре 2014 г. Вариации газовых компонент загрязнения атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 481–488.
17. Губанова Д.П., Беликов И.Б., Еланский Н.Ф., Скороход А.И., Чубарова Н.Е. Изменчивость приземной концентрации аэрозолей $\text{PM}_{2.5}$ в г. Москве по наблюдениям в Метеорологической обсерватории МГУ // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1033–1042.

18. Копейкин В.М., Емиленко А.С., Исаков А.А., Лоскутова О.В., Пономарева Т.Я. Изменчивость сажевого и субмикронного аэрозоля в Московском регионе в 2014–2016 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 1. С. 5–10.
19. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики Ч. 1. Географические особенности и временная динамика // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 8. С. 716–722.
20. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики Ч. 2. Вертикальное распределение // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 9. С. 733–739.
21. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Воронцовская Н.Г., Головки А.К., Давыдов Д.К., Козлов А.С., Певнева Г.С., Симоненков Д.В., Фофанов А.В. Органический аэрозоль в атмосфере Сибири и Арктики Ч. 3. Продукты лесных пожаров // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 9. С. 740–749.
22. Семутникова Е.Г., Горчаков Г.И., Ситнов С.А., Копейкин В.М., Карпов А.В., Горчакова И.А., Пономарева Т.Я., Исаков А.А., Гуцин Р.А., Даценко О.И., Курбатов Г.А., Кузнецов Г.А. Сибирская дымная мгла над Европейской территорией России в ибле 2016 г. Загрязнение атмосферы и радиационные эффекты // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 11. С. 962–970.
23. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nederlec P., Paris Jean-Daniel, Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 12. С. 1043–1052.
24. Емиленко А.С., Свириденков М.А., Копейкин В.М., Генчень Ван. Долговременная изменчивость загрязнения атмосферы черным углеродом в регионе Пекина в осенние периоды // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 497–501.
25. Локощенко М.А., Еланский Н.Ф., Трифонова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О предельных уровнях загрязнения воздуха в Москве // Вестник Московского Университета. Серия 5: География. 2016. № 4. С. 29–39.
26. Котельников С.Н., Степанов Е.В., Челибанов В.П. Пространственно-временная изменчивость содержания приземного озона в Санкт-Петербурге, Кировской области и Крыму в 2011–2012 гг. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 12. С. 1086–1089.
27. Панов А.В., Прокушкин А.С., Брюханов А.В., Колец М.А., Пономарев Е.И., Сиденко Н.В., Зражевская Г.К., Тиохина А.В., Андреа М.О. Комплексный подход в оценке эмиссии углеродсодержащих газов от лесных пожаров в Сибири // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 30–38.
28. Янченко Н.И., Котова Е.И. Источники фтора в атмосферных осадках в г. Братск // Метеорология и гидрология. 2018. № 5. С. 108–112.
29. Заяханов А.С., Жамсуева Г.С., Цыдыпов В.В., Бальжанов Т.С. Суточная динамика озона и других малых газовых примесей в прибрежной зоне озера Байкал (стационар Боярский) // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 85–92.
30. Боярский А.Н., Арабов А.Я., Голицын Г.С., Груздев А.Н., Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Мохов И.И., Савинных 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.
31. Тимохина А.В., Прокушкин А.С., Онучин А.А., Панов А.В., Кофман Г.Б., Верховец С.В., Хайманн М. Многолетний тренд концентрации CO₂ в приземной атмосфере над центральной Сибирью // Метеорология и гидрология. 2015. № 3. С. 58–64.
32. Романчук А.Ю., Калмыков С.Н., Керстинг А., Заварин М. Поведение плутония в окружающей среде // Успехи химии. 2016. Т. 85. № 9. С. 995–1010.
33. Березина Е.В., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Еланский Н.Ф., Беликов И.Б. Ароматические летучие органические соединения и их роль в формировании приземного озона на территории России // Доклады академии наук. 2017. Т. 474. № 3. С. 356–360.
34. Кожневников В.Н., Еланский Н.Ф., Моисеенко К.Б. Вариации содержания озона и двуоксида азота в поле орографических волн над приполярным Уралом // Доклады академии наук. 2017. Т. 475. № 6. С. 691–696.
35. Голицын Г.С., Гречко Е.И., Генчен Ван, Пусай Ван, Джоза А.В., Емиленко А.С., Копейкин В.М., Ракинин В.С., Сафронов А.Н., Фокеева Е.В. Исследование загрязнения атмосферы Москвы и Пекина окисью углерода и аэрозолем // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 8–19.
36. Еланский Н.Ф., Локощенко М.А., Трифонова А.В., Беликов И.Б., Скороход А.И. О содержании малых газовых примесей в приземном слое атмосферы над Москвой // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 39–45.
37. Виралайнен Я.А., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Кирнер О., Хёпфнер М. Содержание нитрата хлора в атмосфере над Санкт-Петербургом // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 1. С. 60–68.
38. Смышляев С.П., Мареев Е.А., Галин В.Я., Блакитная П.А. Моделирование влияния выбросов метана из арктических газовых гидратов на региональные изменения состава нижней атмосферы

- ры // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 4. С. 472–483.
39. 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 // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 51–63.
 40. Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А. Кислотность атмосферных осадков и выпадение серы и азота на территории Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова // Метеорология и гидрология. 2015. № 10. С. 44–53.
 41. Кашин Ф.В., Арефьев В.Н., Сизов Н.И., Акименко Р.М., Упенэк Л.Б. Фоновая составляющая окиси углерода в приземном воздухе (станция мониторинга «Обнинск») // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 1–7.
 42. Ситнов С.А., Мохов И.И., Джола А.В. Общее содержание оксида углерода в атмосфере над Российскими регионами по спутниковым данным // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 38–55.
 43. Ионов Д.В., Поберовский А.В. Интегральная эмиссия окислов азота с территории Санкт-Петербурга по данным мобильных измерений и численного моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 232–241.
 44. Ситнов С.А., Мохов И.И., Горчаков Г.И., Джола А.В. Дымная мгла на европейской части России летом 2016 г.: связь с лесными пожарами в Сибири и аномалиями атмосферной циркуляции // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 50–63.
 45. Sitnov S.A., Mokhov I.I. Weekly cycles of formaldehyde and nitrogen dioxide in the atmosphere over Northern Eurasia: Anthropogenic or natural? // Proc. SPIE. 2017. V. 10466. № 104665T. P. 1–11. doi: 10.1117/12.2287151
 46. Sitnov S.A., Mokhov I.I. Formaldehyde and nitrogen dioxide in the atmosphere during summer weather extremes and wildfires in European Russia in 2010 and Western Siberia in 2012 // Intern. J. Remote Sensing. 2017. V. 38. Issue 14. P. 4086–4106.
 47. Белан Б.Д., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н. Исследование связи снежного покрова и концентрации озона в приземном слое воздуха в районе г. Томска // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 8. С. 665–669.
 48. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Аэрозоль в тропосфере и нижней стратосфере // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г., М.: Физматкнига, 2018, с. 108.
 49. Ермаков А.Н., Алоян А.Е., Арутюнян В.О. Карбонатные частицы аэрозоля в городской атмосфере и их химические превращения (на примере Иркутска) // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г., М.: Физматкнига, 2018, с. 135.
 50. Еремич И.Д., Алоян А.Е., Арутюнян В.О., Ларин И.К., Чубарова Н.Е., Ермаков А.Н. Гидрокарбонаты в атмосферных осадках в Москве: данные мониторинга и их анализ // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 3. С. 379–388.
 51. Зеленов В.В., Апарина Е.В., Каштанов С.А., Шардакова Э.В. Исследование начального захвата NO₂ на покрытии из метановой сажи // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 3. С. 87–96.
 52. Зеленов В.В., Апарина Е.В., Каштанов С.А., Шардакова Э.В. Кинетика захвата N₂O₅ на покрытии из метановой сажи // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 4. С. 78–91.
 53. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Аэрозоль в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Сульфатные частицы в северных широтах // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 2. С. 136–142.
 54. Манаков А.Ю., Пеньков Н.В., Родионова Т.В., Нестеров А.Н., Фесенко Е.Е. мл. Кинетика процессов образования и диссоциации газовых гидратов // Успехи химии. 2017. Т. 86. № 9. С. 845–869.
 55. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Механизм и кинетика образования и переноса аэрозольных частиц в нижней стратосфере // Журнал физической химии. 2018. Т. 92. № 3. С. 483–488.
 56. Голубев В.Н. Роль аэрозольных частиц зарождения атмосферного льда // Метеорология и гидрология. 2015. № 12. С. 19–28.
 57. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Роль сульфатного в формировании облачности над морем // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 4. С. 402–415.
 58. Ларин И.К., Алоян А.Е., Ермаков А.Н. Хлорная активация нижней стратосферы в средних широтах: влияние на озоновый слой // Химическая физика. 2016. Т. 35. № 9. С. 76–80.
 59. Алоян А.Е., Ермаков А.Н., Арутюнян В.О. Моделирование образования полярных стратосферных облаков с учетом кинетических и гетерогенных процессов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 3. С. 276–286.
 60. Лушников А.А., Загайнов В.А., Любовцева Ю.С. Начальная стадия образования аэрозоля из пересыщенных паров // Журнал физической химии. 2018. Т. 92. № 3. С. 501–507.
 61. Кумпаненко И.В., Рошман А.В., Иванова А., Зеленина Е.И., Волоченко Т.С., Панин Е.О. Гетерогенное фотокаталитическое окисление загрязняющих веществ в воздухе на частицах TiO₂ // Химическая физика. 2018. Т. 37. № 2. С. 25–34.

62. Горчаков Г.И., Сметнов С.А., Семутникова Е.Г. «Старение» дымового аэрозоля при дальнем переносе // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г. М.: Физматкнига. 2018. С. 127.
63. Коновалов И.Б., Березина Е.В., Бекианн М. Эффект фотохимического самовоздействия углеродсодержащего аэрозоля: природные пожары // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 3. С. 300–308.
64. Ларин И.К. Химическая физика озонового слоя. М.: РАН. 2018. С. 212.
65. Ларин И.К. О восстановлении озонового слоя в Северном полушарии в XXI веке // Химическая физика. 2015. Т. 34. № 1. С. 80–86.
66. Ларин И.К. Химический состав средней атмосферы и его изменение в XXI веке // Химическая физика. 2018. Т. 37. № 11. С. 88–92.
67. Ермаков А.Н., Ларин И.К. Химическая физика озонового слоя // История науки и техники. 2017. № 3. С. 90–100.
68. Ларин И.К. О теории цепных процессов озоносферы // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г. М.: Физматкнига. 2018. С. 149.
69. Ларин И.К. О вкладе O_x , NO_x , NO_x , ClO_x и BrO_x -циклов в разрушение стратосферного озона в XXI веке // Химическая физика. 2017. Т. 36. № 1. С. 90–96.
70. Ларин И.К. Нечетный кислород и его атмосферное время жизни // Химическая физика. 2017. Т. 36. № 3. С. 87–91.
71. Ларин И.К. О нерешенных проблемах химии средней атмосферы // Химическая физика. 2018. Т. 37. № 8. С. 79–82.
72. Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробашевская Е.А. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэрономия. 2016. Т. 56. № 1. С. 102–116.
73. Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Миронова И.А. Изменения химического состава в полярных областях Земли после протонных вспышек на Солнце (трехмерное моделирование) // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 2, С. 173–194.
74. Груздев А.Н., Агеева В.Ю., Елохов А.С., Мохов И.И. Статистические закономерности внезапных стратосферных потеплений и их влияние на содержание NO_2 и O_3 // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г., М.: Физматкнига, 2018, с. 70.
75. Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С. Зимне-весенние аномалии содержания O_3 и NO_2 в стратосфере над Московским регионом в 2010 и 2011 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 2. С. 223–308.
76. Груздев А.Н., Кропоткина Е.П., Соломонов С.В., Елохов А.С. Аномалии содержания озона и двуокиси азота в стратосфере над Московским регионом как проявление динамики стратосферного полярного вихря // Доклады Академии Наук. 2016. Т. 468. № 4. С. 451–454.
77. Розанов Е.В. Влияние выпадающих энергичных частиц на озоновый слой и климат // Химическая физика. 2018. Т. 37. № 8. С. 73–78.
78. Агеева В.Ю., Груздев А.Н., Елохов А.С. Увеличение стратосферного содержания NO_2 по результатам наземных наблюдений после солнечного протонного события в октябре 2003 г. // Доклады Академии Наук. 2018. Т. 479. № 6. С. 688–691.
79. Чубарова Н.Е., Жданова Е.Ю., Хамматов В.У., Варгин П.Н. Актуальные проблемы изучения ультрафиолетовой радиации и озонового слоя // Вестник Российской Академии Наук. 2016. Т. 86. № 9. С. 839–846.
80. Смышляев С.П., Галин В.Я., Блакитная П.А., Лемищенко А.К. Исследование чувствительности состава и температуры стратосферы к вызванной 11-летним циклом солнечной активности изменчивости спектральных потоков солнечной радиации // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52. № 1. С. 19–36.
81. Ситнов С.А., Мохов И.И. Формирование озоновой «мини-дыры» в условиях продолжительного блокирующего антициклона в атмосфере над Европейской территорией России летом 2010 г. // Доклады Академии Наук. 2015. Т. 460. № 1. С. 74–78.
82. Sitnov S.A., Mokhov I.I., Lupo A.R. Ozone, water vapor, and temperature anomalies associated with atmospheric blocking events over Eastern Europe in spring–summer 2010 // Atmos. Environ. 2017. V. 164. P. 180–194.
83. Ситнов С.А., Мохов И.И., Безверхний В.А. Анализ особенностей связи общего содержания озона и водяного пара над европейской частью России с Североатлантическим колебанием летом 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 6. С. 457–461.
84. Агеева В.Ю., Груздев А.Н. Сезонные особенности квазидвухлетних вариаций стратосферного содержания NO_2 по результатам наземных измерений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 74–85.
85. Груздев А.Н., Елохов А.С. Многолетнее зондирование стратосферного содержания NO_2 на Звенигородской научной станции ИФА им. А.М. Обухова РАН // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г. М.: Физматкнига. 2018. С. 131.

86. *Криволицкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Реннев А.И., Банин М.В.* Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55. № 1. С. 64–93.
87. *Иванова А.Р.* Стратосферно-тропосферный обмен и его некоторые особенности во внетропических широтах // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 3. С. 22–45.
88. *Тимофеев Ю.М., Прялков А.В., Поберовский А.В.* Рост содержания хлорводорода в атмосфере Северного полушария прекращается // *Доклады Академии Наук*. 2016. Т. 470. № 3. С. 344–346.
89. *Мурышев К.Е., Елисеев А.В., Мохов И.И., Тимажев А.* Взаимное запаздывание между изменениями температуры и содержания углекислого газа в атмосфере в простой совместной модели климата и углеродного цикла // *Доклады Академии Наук*. 2015. Т. 463. № 6. С. 708–712.
90. *Попова В.В., Мацковский В.В., Михайлов А.Ю.* Современные изменения климата суши внетропической зоны Северного полушария // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2018. № 1. С. 3–13.
91. *Дергачев В.А., Распопов О.М., Тясто М.И., Дмитриев П.Б., Исмагилов В.С., Благовещенская Е.Э.* Проявление циклической солнечной активности в палеоклиматических параметрах ~100–150 млн лет назад // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2015. Т. 55. № 5. С. 579–586.
92. *Дергачев В.А.* Палеоклимат Земли и солнечная активность // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017. Т. 57. № 5. С. 567–571.
93. *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А., Кириченко К.Е.* Роль солнечной активности в наблюдаемых изменениях климата XX веке // *Геомагнетизм и аэрономия*. 2017. Т. 57. № 6. С. 687–695.
94. *Вакуленко Н.В., Котляков В.М., Сонечкин Д.М.* О связи антропогенного роста концентрации углекислого газа и современного потепления // *Доклады Академии Наук*. 2017. Т. 477. № 1. С. 87–91.
95. *Демченко П.Ф., Семенов В.А.* Оценка неопределенности климатических трендов приповерхностной температуры, связанной с внутренней динамикой атмосферы // *Доклады Академии Наук*. 2017. Т. 476. № 3. С. 339–342.
96. *Мохов И.И.* Оценка способности современных климатических моделей адекватно оценивать риск возможных региональных аномалий и тенденций изменения // *Доклады Академии Наук*. 2018. Т. 479. № 4. С. 452–455.
97. *Спорышев П.В., Катцов В.М., Гулев С.К.* Изменение приземной температуры в Арктике: достоверность модельного воспроизведения и вероятностный прогноз на близкую перспективу // *Доклады АН*. 2018. Т. 479. № 5. С. 569–573.
98. *Володин Е., Грицун А.* О природе замедления глобального потепления в начале XXI в. // *Доклады Академии Наук*. 2018. Т. 482. № 3. С. 315–318.
99. *Хлыстов А.И., Клиге Р.К., Симкин В.С.* Глобальное потепление и его возможные причины // *Земля и вселенная*. 2018. № 1. С. 60–70.
100. *Стерин А.М., Тимофеев А.А.* Об оценке трендов приземной температуры воздуха для территории России методом квантильной регрессии // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 6. С. 17–30.
101. *Ветров В.А., Борисова О.К., Величко А.А.* Опыт перспективной оценки основных параметров регионального климата до 3000 г. // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 5. С. 12–31.
102. *Бабич В.В., Дарьин А.В., Калугин И.А., Смолянинова Л.Г.* Использование периодических природных процессов для прогноза климата внетропических широт Северного полушария на ближайшие 500 лет // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 9. С. 5–15.
103. *Корнева И.А., Семенов С.М.* Чувствительность температуры земной поверхности к изменению альbedo атмосферы; оценка радиационного эффекта // *Метеорология и гидрология*. 2016. № 5. С. 5–11.
104. *Поляков А.В., Головин Ю.М., Делер В., Эртель Д., Шпенкух Д.* Сопоставление спектров уходящего теплового ИК-излучения разных лет // *Исследование Земли из космоса*. 2018. № 5. С. 65–72.
105. *Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Itasu R.* Программное обеспечение для моделирования переноса излучения теплового и ближнего ИК-диапазонов в атмосфере с учетом многократного рассеяния // *Оптика атмосферы и океана*. 2017. Т. 30. № 2. С. 128–133.
106. *Катцов В.М., Школьник И.М., Ефимов С.В.* Перспективные оценки изменений климата в российских регионах: детализация в физическом и вероятностном пространствах // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 7. С. 68–80.
107. *Рябошапка А.Г., Ревокатова А.П.* Потенциальная роль негативной диоксида углерода в решении климатической проблемы // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 7. С. 18–36.
108. *Вакуленко Н.В., Нигматулин Р.И., Сонечкин Д.М.* К вопросу о глобальном изменении климата // *Метеорология и гидрология*. 2015. № 9. С. 89–97.
109. *Дмитриева Т.М., Грабар В.А.* Авиационные выбросы Российской гражданской авиации при выполнении внутренних рейсов в 2000–2012 гг. и интегральная оценка их воздействия на климатическую систему // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 8. С. 76–84.
110. *Экба Я.А., Ахсалба А.К., Лебедев С.А., Бедаиных М.К.* Воздействие вулканической деятельности на температуру приземного слоя

- воздуха / Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г. М.: Физматкнига, 2018. С. 99.
111. *Лыкосов В.Н.* Региональные аспекты моделирования климата и его изменений // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г. М.: Физматкнига. 2018. С. 14.
112. *Мохов И.И.* Современные изменения климата: аномалии и тенденции // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г. М.: Физматкнига. 2018. С. 15.
113. *Денисов С.Н., Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М.* Модельные оценки глобальных и региональных эмиссий метана в атмосферу влажными экосистемами // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 5. С. 543–549.
114. *Аржанов М.М., Мохов И.И., Денисов С.Н.* Влияние региональных климатических изменений на устойчивость реликтовых газовых гидратов // Доклады АН. 2016. Т. 468. № 5. С. 572–574.
115. *Аржанов М.М., Мохов И.И., Денисов С.Н.* Дестабилизация реликтовых газовых гидратов при наблюдаемых региональных изменениях климата // Арктика: экология и экономика. 2016. № 4. С. 46–51.
116. *Ситнов С.А., Мохов И.И., Джолола А.В.* Общее содержание оксида углерода в атмосфере над российскими регионами по спутниковым данным // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2017. Т. 53. № 1. С. 38–55.
117. *Ситнов С.А., Мохов И.И., Джолола А.В.* Вариации монооксида углерода в атмосфере в условиях блокирования над европейской территорией России летом 2010 г. (по данным AIRS) // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 3. С. 214–221.
118. *Аржанов М.М., Мохов И.И.* Оценки степени устойчивости континентальных реликтовых метангидратов в оптимуме голоцена и при современных климатических условиях // ДАН. 2017. Т. 476. № 4. С. 456–460.
119. *Ситнов С.А., Мохов И.И.* Аномалии содержания метана в атмосфере над севером Евразии летом 2016 г. // Доклады АН. 2018. Т. 480. № 2. С. 223–228.
120. *Аржанов М.М., Малахова В.В., Мохов И.И.* Условия формирования и диссоциации метангидратов в течение последних 130 тысяч лет по модельным расчетам // ДАН. 2018. Т. 480. № 6. С. 725–729.
121. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Краснов О.А., Macsutov S., Machida T., Sasakawa M., Фофанов А.В.* Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом западной Сибири в летний период // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 8. С. 670–681.
122. *Задворных И.В., Грибанов К.Г., Захаров В.И., Itasu R.* Метод для определения вертикального профиля метана из спектров атмосферы, измеренных одновременно в тепловом и ближнем ИК диапазонах // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 12. С. 962–967.
123. *Насртдинов И.М., Журавлева Т.Б., Чеснокова Т.Ю.* Оценки прямых радиационных эффектов фонового и дымового аэрозоля в ИК-области спектра для летних условий Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31. № 2. С. 121–127.
124. *Виноградова А.А., Васильева А.В.* Черный углерод в воздухе северных районов России: источники, пространственные и временные вариации // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 467–475.
125. *Ракитин В.С., Еланский Н.Ф., Панкратова Н.В., Скороход А.И., Джолола А.В., Штабкин Ю.А., Ван Пусай, Ван Генчен, Васильева А.В., Макарова М.В., Гречко Е.И.* Исследование трендов общего содержания СО и СН₄ над Евразией на основе анализа наземных и орбитальных спектроскопических измерений // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 6. С. 449–456.
126. *Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Складнева Т.К., Фофанов А.В., Sasakawa M., Machida T.* Влияние атмосферного блокирования в западной Сибири на изменение концентрации метана в летний период // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 5. С. 393–403.
127. *Глаголев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максюттов Ш.Ш.* Поток метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 4. С. 301–309.
128. *Горчаков Г.И., Карпов А.В., Васильев А.В., Горчакова И.А.* Коричневый и черный углерод в смогах мегаполисов // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30. № 1. С. 5–11.
129. *Скороход А.И., Панкратова Н.В., Беликов И.Б., Ракитин В.С., Штабкин Ю.А., Томпсон Р.* Исследование источников атмосферного метана в Арктике // Сборник тезисов международной конференции, посвященной столетию со дня рождения академика Александра Михайловича Обухова, 16–18 мая 2018 г. М.: Физматкнига. 2018. С. 168.
130. *Мохов И.И., Смирнов Д.А.* Вклад радиационного воздействия парниковых газов и атлантической мультидесятилетней осцилляции в тренды приповерхностной температуры // Метеорология и гидрология. 2018. № 9. С. 5–13.

Russian Studies in the Field of Atmospheric Chemistry in 2015–2018

I. K. Larin

*V.L. Talrose Institute of Energy Problems of Chemical Physics
of the Federal State Budgetary Institution of Science
of the Federal Research Center for N.N. Semenov Chemical Physics,
Russian Academy of Sciences
Leninsky pr., 38-2, Moscow, 119334, Russia
e-mail: *kalashnik-obn@mail.ru, **snik1953@gmail.com*

Received: 04.07.2019

Accepted: 07.08.2019

A brief overview of the work of Russian scientists in the field of atmospheric chemistry in 2015–2018, including work on the chemistry of the troposphere, the chemistry of the ozone layer and on the role of chemistry in climate change is presented. Review has been prepared in the Commission on atmospheric chemistry of the meteorology and atmospheric sciences section of the national Geophysics Committee. The report was presented and approved at the XXVII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG)¹.

Keywords: chemical processes, heterophase processes, the troposphere, the stratosphere, climate.

¹ Russian National Report/Meteorology and Atmospheric Sciences. 2015–2018 / Eds: I.I. Mokhov, A.A. Krivolitsky. National Geophysical Committee RAS. Moscow: MAX Press, 2019. — 332 p.