

УДК 551.510.534

ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ КАРОЛЬ: СЕМЬ ДЕСЯТИЛЕТИЙ В НАУКЕ

© 2022 г. А. А. Киселёв^а, Е. В. Розанов^{б, в, г, *}, В. А. Фролькис^{а, д}, С. П. Смышляев^{е, **}

^а Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, ул. Карбышева, д. 7, Санкт-Петербург, 194021 Россия

^б Физико-метеорологическая обсерватория Давоса, Всемирный радиационный центр,
Дорфштрассе, 33, Давос-Дорф, 7260 Швейцария

^в Санкт-Петербургский государственный университет,
Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^д Санкт-Петербургский государственный экономический университет,
ул. Садовая, 21, Санкт-Петербург, 191023 Россия

^е Российский государственный гидрометеорологический университет,
Воронежская ул., 79, Санкт-Петербург, 192007 Россия

*e-mail: Eugene.Rozanov@pmodwrc.ch

**e-mail: smyshl@rshu.ru

Поступила в редакцию 30.11.2021 г.

После доработки 03.12.2021 г.

Принята к публикации 08.12.2021 г.

В статье рассказано о вкладе в мировую и отечественную науку Игоря Леонидовича Кароля. Выделено три этапа его научных исследований – (1) динамики атмосферы, (2) химических и радиационных процессов в атмосфере, (3) современных изменений климата. Уделено внимание педагогической деятельности И.Л. Кароля и его вкладу в популяризацию науки.

Ключевые слова: математическое моделирование, химия и динамика атмосферы, озоносфера, изменения климата

DOI: 10.31857/S0002351522020055

21 октября 2021 г. не стало Игоря Леонидовича Кароля – блестящего ученого, прекрасного педагога, популяризатора науки. С ним ушла целая эпоха. Увы, настало время подвести итоги пройденного им творческого пути. Этот путь можно разделить на подготовительный период и три больших периода активной научной работы.

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЙ ПЕРИОД

Игорь Леонидович получил прекрасную математическую подготовку: по итогам обучения на математико-механическом факультете Ленинградского государственного университета (1944–1949 гг.) по кафедре гидроаэромеханики был получен диплом с отличием. Далее последовало трехлетнее обучение в аспирантуре на кафедре математической физики, результатом которого стала успешная защита в ноябре 1952 г. кандидатской диссертации на тему: “Некоторые краевые задачи для уравнений в частных производных смешанного эллиптического – гиперболического типа”. Такая подготовка предопределила на всю жизнь выбор научного направления его исследований, связанного с математическим мо-

делированием процессов, происходящих в окружающей среде.

Следует отметить еще один важный аспект: в семье Игоря Леонидовича придавали важное значение изучению иностранных языков. Как следствие, к моменту начала своей исследовательской деятельности он свободно владел английским языком, на бытовом уровне – французским и немецким. В дальнейшем это знание стало надежной основой как при ознакомлении со свежими статьями в иностранной периодике и при собственных публикациях в ней, так и при живом контакте с зарубежными коллегами, а, значит, позволяло “держаться руку на пульсе” не только отечественных, но и иностранных последних научных достижений.

ПЕРИОД ПЕРВЫЙ. ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРЫ

Хотя современные модельные исследования в области метеорологии и климатологии опираются на фундаментальные законы природы (“законы сохранения”, описываемые обычно системой уравнений Навье–Стокса), они по большей части посвящены решению прикладных задач, наиболее актуальных на данный момент времени. В



ИГОРЬ ЛЕОНИДОВИЧ КАРОЛЬ (1927–2021)

1950–60-е гг. такой задачей стала необходимость изучения и оценки последствий движения в экваториальной стратосфере облаков, образовавшихся в результате ядерных взрывов - продуктов производимых в те годы испытаний водородных бомб на тихоокеанских островах. Такие работы проводились, в частности, в Геофизическом Институте АН СССР (ныне Институт Экспериментальной Метеорологии в составе НПО “Тайфун”), куда на должность старшего научного сотрудника в августе 1956 г. пришел И.Л. Кароль. Специфика той поставленной перед учеными задачи не располагала к ее освещению в открытой печати. Тем не менее, некоторые результаты тех исследований с участием Игоря Леонидовича можно найти в [1, 2].

В этот период, наряду с работой по плановой тематике, Игорь Леонидович занимался теоретической разработкой модели, воспроизводящей реальные динамические атмосферные процессы. Эта модель, численная, построенная на конечно-разностном подходе, в дальнейшем была реализована и положена в основу его докторской диссертации на тему “Расчет глобального распространения и выпадения радиоактивных изотопов и вопросы

планетарного обмена в тропосфере и нижней стратосфере”, защита которой состоялась в 1970 г.

Двумя годами позже диссертационные материалы легли в основу статьи [3] и монографии [4], впоследствии ставшей учебником для специалистов, занимающихся моделированием атмосферной циркуляции, причем, не только в нашей стране, но и за рубежом (она была переведена на английский язык и издана в 1974 г. [5]). В статье [3] был сделан вывод о важной роли учета циркуляции для переноса примесей. Рис. 1, заимствованный из [3], показывает, как циркуляция при расчете переноса изотопа ^{54}Mn влияет на модельные результаты. Эту работу логично было продолжить, используя более мощную вычислительную технику, однако к этому времени уже возникли новые задачи, а “шаги в неизвестное” всегда больше привлекали Игоря Леонидовича, принимавшего вызов.

ПЕРИОД ВТОРОЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ И РАДИАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В АТМОСФЕРЕ

В 1972 году И.Л. Кароль окончательно возвращается в родной город, чтобы работать в Главной

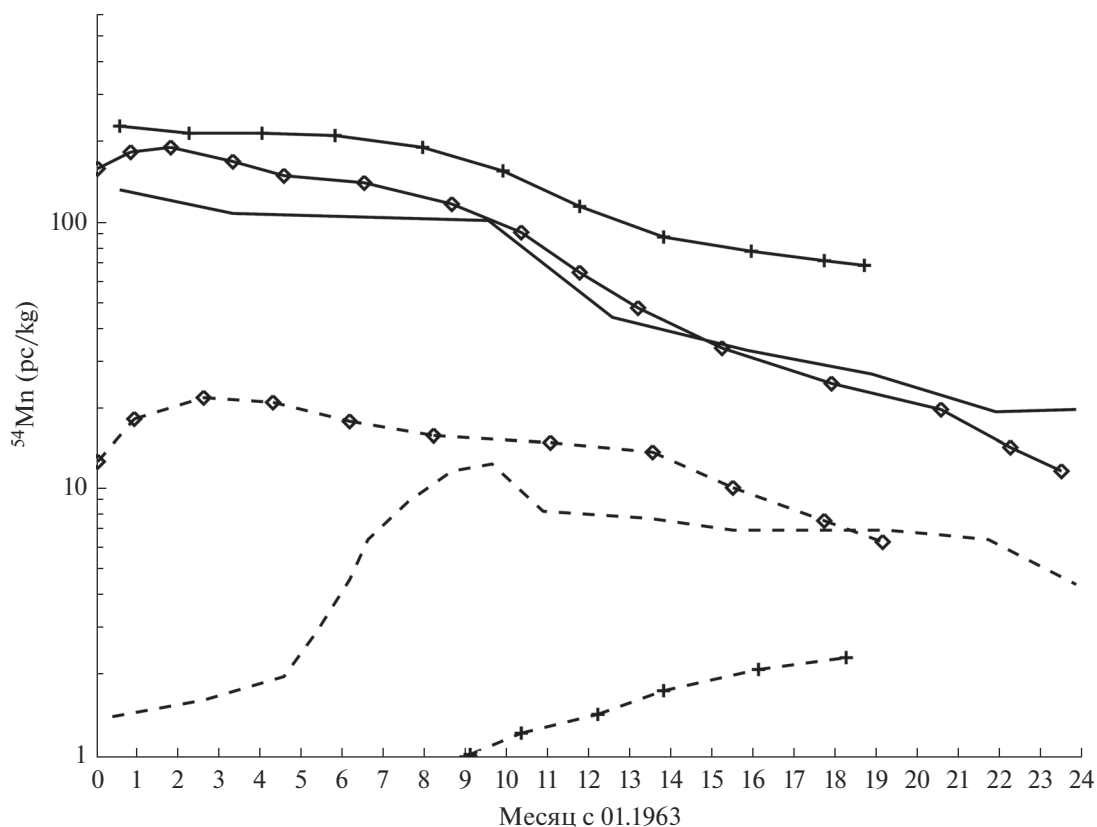


Рис. 1. Концентрации ^{54}Mn на высотном уровне 20 км и на 40° с.ш. (сплошные линии) и 40° ю.ш. (пунктирные линии) по измерениям и расчетам для вариантов модели без циркуляции (плюс) и с учетом циркуляции (ромб). Рассчитанная концентрация умножена на соответствующий поправочный коэффициент А. Рисунок выполнен по данным из [3].

геофизической обсерватории, по приглашению ее тогдашнего директора М.И. Будыко. Перед ним и созданной под его началом лабораторией в разные годы ставился целый комплекс задач — получение модельных оценок: а) последствий попадания в атмосферу продуктов сгорания топлива авиационных и ракетных двигателей, б) откликов климатической системы на антропогенное загрязнение атмосферы, в) возможных радиационных и фотохимических эффектов, вызванных ядерными взрывами, г) влияния солнечной радиации на газовый состав атмосферы и др. В 1970-х годах, по существу, состоялось рождение химии атмосферы как отдельной науки. Для ее успешного развития были необходимы усилия многих специалистов: отсутствовали мониторинг содержания и эволюции компонентов атмосферного воздуха, данные о кинетике фотохимических реакций и, конечно, численные модели, способные адекватно действительности воспроизводить комплекс этих реакций. Более того, прямая зависимость характера химических взаимодействий от интенсивности солнечного излучения и температуры обуславливала необходимость включения в модели расчетов радиационных потоков. На создание (од-

новременно с западными учеными) первых моделей взаимодействий радиационных и фотохимических процессов — моделей одномерных и двумерных, ушли первые годы работы в ГГО. Постепенно стали появляться и плоды этой работы.

Красной нитью через исследования тех лет прошла озоновая проблема. После того, как в первой половине 1970-х появился ряд работ, указывающих на вероятные механизмы разрушения озонового слоя Земли [6–9] (в середине 1980-х “подкрепленных” открытием антарктической озоновой дыры), изучение озоносферы стало приоритетным направлением исследований. И.Л. Кароль, наряду с А.Х. Хргианом, — крупнейший отечественный специалист в этой области, а модельные исследования озоносферы — его вотчина. Помимо многочисленных статей, Игорем Леонидовичем подготовлены монография, в которой изложены подробное описание парка используемых его лабораторией моделей и результаты модельных расчетов при помощи этих моделей [10], а позже обобщающая статья [11].

В эти годы у И.Л. Кароля сформировалось понимание путей развития моделей, предназначенных для исследования озонового слоя. Он пони-

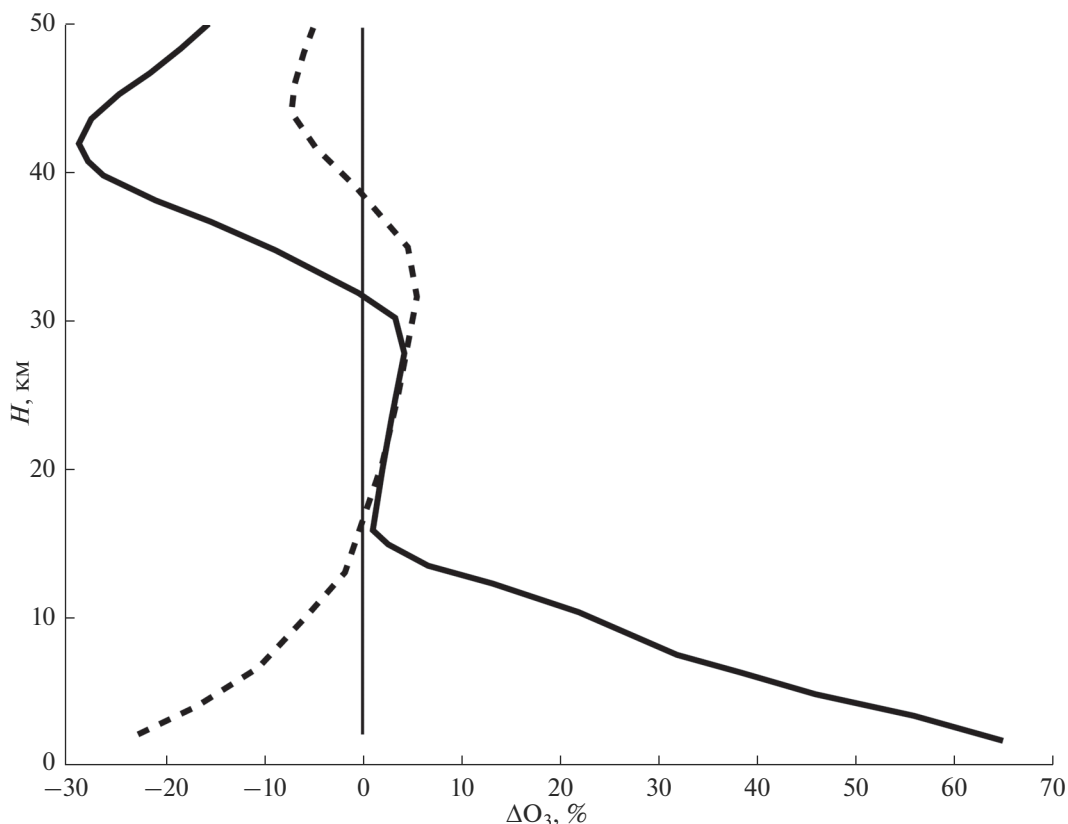


Рис. 2. Вертикальные профили отклонения расчетной концентрации озона (%) от доиндустриального профиля: период 1985 г. (сплошная линия), ледниковый период (пунктирная линия). Рисунок построен по данным из работы [16].

мал необходимость постепенного наращивания сложности моделей путем подключения новых механизмов и увеличения временного и пространственного охвата, осознавая в то же время наличие ограниченных вычислительных возможностей. В результате этой политики ряд использованных И.Л. Каролем моделей включал

их иерархию. Боксовые модели, например, использовались для оценки фотохимических преобразований в выбросах самолетов и ракет [12]. Одним из важных достижений стал вывод о возможном разрушении озона выбросами американских Шаттлов, продемонстрированный в высокоцитируемой статье [13]. Одномерные радиационно-конвективные и фотохимические модели использовались для оценок воздействия на озон эмиссий хлор- и бромсодержащих химикатов, полетов гражданской авиации, 11-летнего цикла солнечной активности, вулканических извержений, кувейтских нефтяных пожаров, последствий ядерной войны, расчета озоноразрушающих потенциалов некоторых химикатов и других целей. Дальнейший прогресс был связан с созданием двумерной модели [14], которая наряду с одномерной фотохимической моделью была применена для расчетов состояния озонового слоя в последнем ледниковом периоде [15, 16]. Рисунок 2 из [16] показывает обнаруженное сильное уменьшение концентрации тропосферного озона по сравнению с настоящим временем (ср. кривые 1 и 6), связанное с отсутствием антропогенных загрязнителей в прошлом.

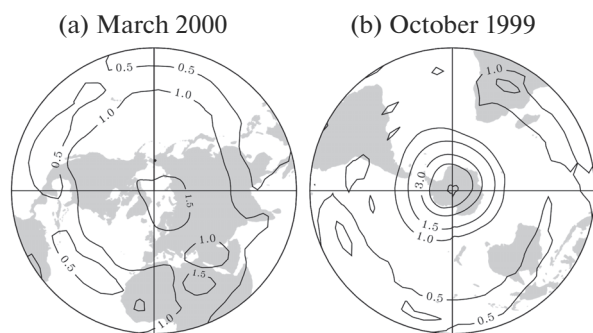


Рис. 3. Географическое распределение общего разрушения озона, предотвращенного Монреальским протоколом в процентах в марте 2000 г. (а) и октябре 1999 г. (б). Значения изолиний равны 0.0; 0.5; 1.0; 1.5; 3.0; 4.0; 5.0%. Рисунок построен по данным из работы [18].

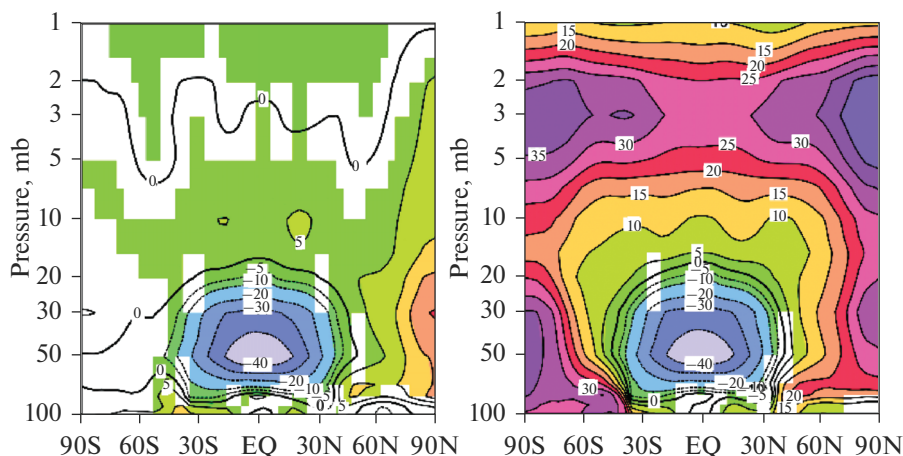


Рис. 4. Зональные, среднегодовые и средние по ансамблю изменения концентрации озона. Соотношение (%) с 2000 по 2100 гг., вызванное всеми факторами (слева) и только нагревом океана (справа). Цвет указывает регионы, где изменения оцениваются статистически значимыми на уровне 5% или выше.

На рубеже XX и XXI веков в лаборатории была впервые создана трехмерная химико-транспортная модель MEZON, представленная позже в высокоцитируемой публикации [17]. Эта модель открыла возможность более точного расчета состояния озонового слоя и его отклика на ограничения производства галогеносодержащих примесей [18]. Рис. 3 показывает, что уже к 2000 году Монреальский протокол спас около 3% озона в южном полушарии.

Модель MEZON, созданная при активном и непосредственном участии И.Л. Кароля, послужила базой для разработки и применения в последующие десятилетия целого семейства моделей земной системы с интерактивной химией (см., например, [19]).

Благодаря постоянному совершенствованию математических моделей, достижению их высокой интерактивности, произошло качественное улучшение прогнозов, как будет меняться общее содержание озона в зависимости от многих формирующих его факторов (эволюции озonoактивных составляющих атмосферного воздуха, интенсивности полетов гражданской авиации, условий освещенности атмосферы и пр.), соответствующие оценки представлены в [20, 21]. Одним из интереснейших выводов стало выяснение особенностей влияния парникового потепления. В работе [21] и на рис. 4 показано рассчитанное с помощью химико-климатической модели SOCOL изменение содержания озона в будущем за счет всех действующих факторов и только за счет увеличения температуры поверхности океана. Сравнение графиков показывает, что значительное уменьшение содержания озона в тропической нижней стратосфере почти полностью объясняется ускорением

циркуляции Брюера–Добсона, вызванным парниковым потеплением.

Однако, несмотря на то, что озоновая тематика превалировала, одновременно велись исследования и по другим направлениям. В частности, анализировалась зависимость концентрации ключевого, способствующего самоочищению атмосферы радикала гидроксила от содержания в тропосфере азотных окислов и окиси углерода [22–24], моделировались процессы, происходящие в конвективном облаке [25], оценивались последствия нанесения ядерного удара [26], изучалось влияние внешних условий на состав авиационных выбросов [27] и воздействия солнечных протонных вспышек на мезосферу [28], реконструировались газовый состав и температура атмосферы в последние ледниковый и межледниковый периоды [16] и др.

ПЕРИОД ТРЕТИЙ. МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Несмотря на то, что изучение и защита озонового слоя по сей день остаются актуальными, параллельно существует еще одна глобальная проблема — проблема современных беспрецедентно быстрых изменений климата, которая в последние десятилетия вышла на первый план. Причина этих изменений, как известно, кроется в усилении парникового эффекта в результате хозяйственной деятельности человека (см., например, [29]). Переключение на климатическую тематику для Игоря Леонидовича не вызвало принципиальных трудностей, поскольку многие парниковые газы прямо или косвенно участвовали в формировании озонового слоя, то эволюция их концентраций в атмосфере рассчитывалась в уже

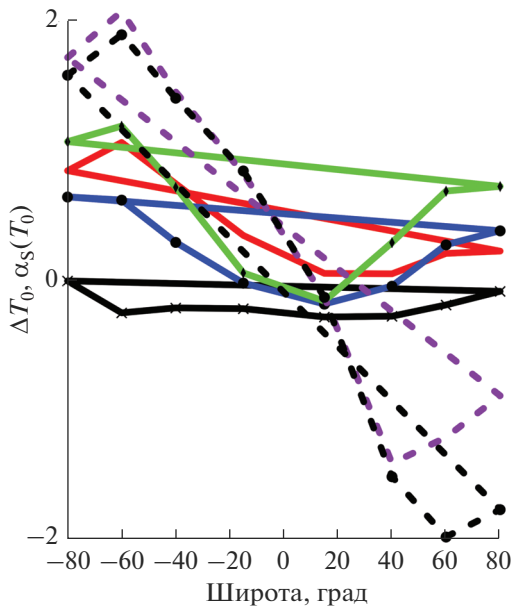


Рис. 5. Широтный ход изменения температуры за счет повышения концентраций парниковых газов с 1850 по 2010 гг. и увеличения стратосферного аэрозоля в широтных поясах 90° ю.ш.–90° с.ш. (красная линия), 70° ю.ш.–70° с.ш. (черная сплошная линия), 50° ю.ш.–50° с.ш. (синяя линия), 30° ю.ш.–30° с.ш. (зеленая линия), 30° с.ш.–50° с.ш. (фиолетовая пунктирная линия), 30° с.ш.–70° с.ш. (черная пунктирная линия).

построенных моделях (да и сам озон является парниковым газом). Таким образом, имеющиеся модели нуждались лишь в относительно небольшой корректировке с учетом специфики новых задач.

Одной из таких задач стало обсуждение критериев, позволяющих сравнивать относительные вклады различных факторов в глобальное потепление.

В работе [30] рассматривается набор метрик, численно характеризующих как глобальный эффект потепления, так и эффекты, обусловленные отдельными природными явлениями и индивидуально парниковыми газами. Одновременно представлены оценки изменений температурного режима в соответствии со сценариями эмиссии парниковых газов. Проблема компенсации парникового потепления путем создания искусственного аэрозольного слоя в стратосфере была затронута в работе [31]. Использование двумерной энергобалансовой модели позволило определить необходимую для компенсации парникового эффекта массу аэрозоля и ограничения по пространственному распределению выбросов аэрозоля. Основные результаты работы показаны на рис. 5. Интерес представляет сложный отклик системы на выброс аэрозоля в стратосферу высоких северных широт.

Отдельное внимание было уделено одному из наиболее эффективных антропогенных парниковых газов – метану. Наличие у него очень разнообразных и трудно поддающихся мониторингу наземных источников (потоки с переувлажненных территорий, продукты жизнедеятельности крупных травоядных животных, выбросы при разработке нефтегазовых и угольных месторождений и пр.) порождало и порождает большие погрешности в ходе их инвентаризации в региональном и глобальном масштабах. Сказанное в полной мере относится и к российской территории. В ходе исследований были получены модельные оценки последствий эмиссии метана с территории нашей страны [32, 33], а также, посредством решения обратной задачи, оценки размеров эмиссии метана с западносибирских месторождений [34, 35]. В последние годы эти работы получили продолжение [36, 37], благодаря грантам РФФИ, руководителем которых был Игорь Леонидович.

Опыт изучения воздействия отклика газового состава и температурного режима [26] пригодился при оценках последствий крупномасштабных пожаров на нефтяных месторождениях Кувейта и лесных пожаров в Сибири и на Дальнем Востоке [38, 39].

Пристальное внимание приковано в последние годы к Арктике. Оно обусловлено темпами потепления региона, многократно превышающими среднеглобальные значения. Арктический совет инициировал целый ряд исследований, предназначенных для изучения региональных особенностей климатообразующих факторов. В одном из них, посвященном модельным оценкам эволюции арктического климата в ближайшем будущем, принял участие в качестве автора И.Л. Кароль [40].

Откликом на фактическое прекращение действия Киотского протокола, после выхода из него Канады, Японии и России стало создание в 2012 г. кампании, направленной на сокращение выбросов ряда газов и аэрозолей, чье воздействие на радиационный режим и на климат значительно, но их время пребывания в атмосфере существенно короче (недели, месяцы или годы), чем у CO_2 . Возникла потребность в критической экспертизе эффективности мер в рамках данного подхода. Проведенный Игорем Леонидовичем с коллегами анализ обширной информации на базе имеющихся литературных источников нашел отражение в обзоре [41].

ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Первый опыт преподавания был получен И.Л. Каролем 1950-е годы, когда он читал лекции и вел практические занятия по высшей математике и математическому анализу сначала в Ленин-

градском инженерно-экономическом институте, а затем в Свердловском государственном педагогическом институте. Этот опыт пригодился в дальнейшем, когда начиная с 1975 года он стал читать курс лекций по динамике атмосферы сначала на математико-механическом, а позже на физическом факультетах Ленинградского государственного университета. Во многом именно из числа слушателей этого курса в последующие годы была сформирована его лаборатория в стенах Главной геофизической обсерватории. В помощь освоения курса Игорь Леонидович подготовил учебную монографию [42], до сих пор не утратившую своего значения, однако диапазон обсуждаемых на лекциях тем был гораздо шире, благодаря его широкой общей и научной эрудиции и осведомленности о самых последних достижениях. Стремительный рост объема климатической информации, в значительной степени связанный с бурным развитием спутникового мониторинга и вычислительных мощностей, сделал очевидной необходимость расширения рамок учебного материала. С 1997/98 учебного года И.Л. Кароль читает лекции по теории климата, теории общей циркуляции атмосферы, современным проблемам климатологии на кафедре климатологии СПбГУ. Этот курс за более чем полтора десятка лет прослушали сотни молодых людей, многие из которых пополнили ряды специалистов, чья работа связана с исследованиями современного климата.

Отдельного упоминания заслуживает деятельность Игоря Леонидовича, направленная на подготовку кадров высшей квалификации. Долгое время он читал лекции для молодых ученых, обучающихся в аспирантуре ГГО. И что не менее важно, под его руководством защитили кандидатские диссертации 15 аспирантов (в том числе авторы данной статьи).

Игорь Леонидович понимал необходимость развития озоновой тематики и численного моделирования атмосферной фотохимии не только в рамках руководимой им лаборатории в ГГО, но и в других научных и учебных организациях СССР, а затем и Российской Федерации. Вдохновленные его лекциями в СПбГУ и на других площадках его ученики создали научные группы в Ленинградском гидрометеорологическом университете (с 1990-х годов Российский государственный гидрометеорологический университет), Новосибирском государственном университете и других организациях, которые развивали и развивают фотохимические модели разной размерности, нацеленные на изучение эволюции озонового слоя и газового состава атмосферы в период изменения климата и меняющегося антропогенного воздействия на окружающую среду. Игорь Леонидович никогда не опасался научной конкуренции и всегда помогал специалистам из других организаций развиваться в научном плане, делился своим

опытом и идеями, предоставлял вычислительные и библиографические возможности своей лаборатории для работы специалистов из других организаций. Во многом благодаря полученным от Игоря Леонидовича знаниям и идеям его ученикам удалось создать в последние годы в рамках СПбГУ Лабораторию исследования озонового слоя и верхней атмосферы, которая получила поддержку программы мегагрантов Правительства Российской Федерации.

ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ НАУКИ

Игорь Леонидович считал важной частью своей работы доводить наиболее значимые результаты исследований, особенно по имеющим широкий общественный резонанс вопросам, до сведения как можно более широкой аудитории — людей любознательных, но занятых в других гуманитарных и технических областях, с другой научной специализацией. Одно время он был лектором общества “Знание”, но признавал невысокую эффективность такого способа популяризации научных знаний из-за малочисленности слушательской аудитории. Большие возможности представлялись при подготовке публикаций либо в виде монографий, либо статей в научно-популярных журналах. И эти возможности он использовал очень активно (особой его любовью пользовался академический журнал “Природа”, и редакция отвечала ему взаимностью).

Неудивительно, что в значительном числе научно-популярных материалов за авторством Игоря Леонидовича уделено внимание различным аспектам состояния и эволюции озоносферы, к этой теме он многократно возвращался [43–46]. Интенсивное изучение мировым “озоновым сообществом” различных аспектов формирования озонового слоя Земли способствовало быстрому пополнению научных знаний о нем, поэтому существовала потребность в оперативном ознакомлении широкого круга специалистов с текущим положением дел. Для удовлетворения этой потребности Игорь Леонидович с коллегами выпускают три монографии [47–49], кроме того он соавторствует в написании регулярно выпускаемых под эгидой Всемирной метеорологической организации обзоров [50, 51], а также в специальном отчете Межправительственной Группы Экспертов по Изменению Климата [52].

Несколько публикаций посвящено другому компоненту атмосферного воздуха, важному антропогенному парниковому газу — метану [53–55]. В разные годы обсуждались проблемы выбросов продуктов сгорания авиационных двигателей [56, 57], последствия возможной ядерной войны [58] и лесных пожаров [59], особенности климата Арктики [60] и России [61], статистика и причины появления экстремальных погодных явлений [62],

эффективность международных соглашений по климату [63] и многое другое.

Ряд научно-популярных публикаций И.Л. Кароля получил общественное признание. Несколько статей стали победителями конкурсов на лучшую научно-популярную статью, проводившихся Российским фондом фундаментальных исследований, рассказ о возможностях, достоинствах и недостатках современных климатических моделей [64] получил первую премию на Всероссийском фестивале науки (конкурс “Наука – обществу”). Книга “Парадоксы климата” [65], подробно рассказывающая о процессах, формирующих климат нашей планеты, причинах и вероятных последствиях его изменения, отмечена премией Росгидромета за лучшие научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы за 2014 г., а также была номинантом на всероссийскую премию “Просветитель”.

ПОДВОДЯ ЧЕРТУ

Сам Игорь Леонидович оценивал свой путь в науке очень скромно: “Фундаментальных результатов не получено, в основном занимался актуальными текущими проблемами физики и химии атмосферы и климата. Вместе со всеми поднимал уровень советской, российской и мировой науки. Актуальность полученных результатов в современном мире быстро падает со временем”. С формальной точки зрения это правда, но...

Первые шаги, открывающие принципиально новые направления исследований всегда трудны. Игорь Леонидович был одним из пионеров применения методов математического моделирования в области атмосферной химии и климата в мире и первым в СССР. Огромная значимость этого прорыва недавно официально признана мировым сообществом: Нобелевская премия по физике за 2021 год присуждена С. Манабе – автору первой (на сегодняшний день уже архаичной) климатической модели. Развитие целого парка оригинальных моделей, счастливо совпавшее с бурным прогрессом в области компьютерных технологий, позволило И.Л. Каролю в течение многих десятилетий проводить теоретические исследования, направленные на решение очень разноплановых задач. Практически все полученные в ходе работы результаты становились новыми, поскольку как химия атмосферы, так и климатология (не в части накопления наблюдательной информации, а в части глубокого анализа климатоформирующих процессов и прогнозов будущих изменений климата) были, по сути, зарождающимися науками. Эти результаты представлены в более чем 230 научных статьях и 20 монографиях (включая научно-популярные).

Особое место в своих работах Игорь Леонидович отводил озоновой проблеме, ряд новаторских исследований в этой области позволил ему по праву войти в число крупнейших в нашей стране и в мире специалистов в области изучения озонового слоя. Другой сферой приложения модельных методов стало исследование причин и последствий изменений современного климата.

Глубокие всесторонние познания и высокий научный авторитет Игоря Леонидовича были востребованы на протяжении многих лет: он представлял нашу страну в ряде международных организаций и проектов (был членом Международной Комиссии по радиоактивности атмосферы, затем Комиссии по химии и глобальным загрязнениям атмосферы Международной Ассоциации по Метеорологии и Физике Атмосферы Международного Союза по Геофизике и Геодезии (МАМФА, МГГС); членом Объединенного Научного Комитета Всемирной Программы Исследования Климата ВПИК ВМО/МСНС с 1987 по 1992 гг.; руководителем проекта “Состав атмосферы” Рабочей группы VIII Совместной Комиссии СССР (Россия) – США в области охраны окружающей среды с 1974 по 1994 гг. и др.), был экспертом Российского Фонда Фундаментальных Исследований и Российского Научного Фонда, участником подготовки Климатической доктрины Российской Федерации и двух Оценочных докладов об изменениях климата Росгидромета, членом редколлегии журнала “Известия РАН. Физика атмосферы и океана” и Journal of Geophysical Research (с 1993 по 1996 гг.), членом ряда научных советов при Росгидромете и РАН.

Плодотворная научная деятельность И.Л. Кароля была отмечена премиями и государственными наградами. Указами Президента ему присвоено звание “Заслуженный деятель науки Российской Федерации”, за заслуги в области метеорологии и многолетнюю плодотворную работу он награжден медалью ордена “За заслуги перед Отечеством” 2-й степени. В 2008 г. Игорю Леонидовичу присуждена премия им. М.И. Будыко (за цикл работ, посвященных проблеме глобальных изменений климата и исследования по изучению изменений газового и аэрозольного состава атмосферы в результате естественных и антропогенных факторов). Межправительственная группа экспертов по изменению климата как Нобелевский лауреат 2007 г. отметила грамотой вклад И.Л. Кароля в ее работу.

Однако своим главным достижением Игорь Леонидович считал не богатое научное наследие, а подготовку к самостоятельной работе своих многих последователей – учеников. Спасибо ему за науку и веру в нас!

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Малахов С.Г., Кароль И.Л. Глобальное распределение в атмосфере и выпадение радиоактивных продуктов ядерных взрывов // Сб. "Радиоактивные изотопы в атмосфере", М.: Атомиздат, 1965. 39 с.
2. Петросяни М.А., Малахов С.Г., Кароль И.Л., Краснопецев Ю.В. Использование радиоактивных трассеров в исследовании глобальных атмосферных процессов // Метеорология и гидрология. 1970. № 4. 10 с.
3. Karol I.L. Numerical model of the global transport of radioactive tracers from the instantaneous sources in the lower stratosphere // J. Geophysical Research. 1970. V. 75. № 18. P. 3589–3603.
4. Кароль И.Л. Радиоактивные изотопы и глобальный перенос в атмосфере Л.: Гидрометеоиздат. 1972. 365 с.
5. Karol I.L. Radioisotopes and global transport in the atmosphere // I.P.S.T. (Israel Program for Scientific Translations). 1974. 323 p.
6. Crutzen P.J. The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content // The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 1970. V. 96. Iss. 408. P. 320–325.
<https://doi.org/10.1002/qj.49709640815>
7. Johnston H.S. Reduction of stratospheric ozone by nitrogen oxide catalysts from supersonic transport exhaust // Science. 1971. V. 173. Iss. 3996. P. 517–522.
<https://doi.org/10.1126/science.173.3996.51>
8. Crutzen P.J. SST's: A threat to the earth's ozone shield // Ambio. 1972. V. 1. № 2. P. 41–51.
9. Molina M., Rowland F.S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalyzed destruction of ozone // Nature. 1974. V. 249. P. 810–812.
<https://doi.org/10.1038/249810a0>
10. Радиационно-фотохимические модели атмосферы / Под ред. Кароля И.Л. Л.: Гидрометеоиздат, 1986. 192 с.
11. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Фотохимические модели атмосферы и их использование в исследованиях озоносферы и климата // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42. № 1. С. 3–34.
12. Karol I.L., Ozolin Y.E., Rozanov E.V., Kiselev A.A. Plume Transformation Index (PTI) of the Subsonic Aircraft Exhausts and Their Dependence on the External Conditions // Geophysical Research Letters. 2000. V. 27. № 3. P. 373–376.
13. Karol I.L., Ozolin Y.E., Rozanov E.V. Effect of space rocket launches on ozone // Annales Geophysicae. 1992. V. 10. P. 810–814.
14. Zubov V.A., Karol I.L., Rozanov E.V., Ozolin Y.E. The zonally-averaged model of the photochemical, radiative and dynamical processes in the troposphere and stratosphere. Part 1: The description of the model and model validation // Physics of Atmosphere and Ocean (Russian Academy of Sciences). 1995. V. 31. № 4. P. 4697–4706.
15. Karol I.L., Zubov V.A., Rozanov E.V., Brihl Ch., Zieger A. Model reconstruction of seasonal and latitudinal changes of temperature, gas transport and composition in the stratosphere of the preindustrial and last glacial periods // Doklady Akademii Nauk. 1997. V. 357. P. 99–103.
16. Karol I.L., Kiselev A.A., Frolkis V.A. Radiative-photochemical modeling of the annually averaged composition and temperature of the global atmosphere during the last glacial and interglacial periods // J. Geophysical Research. 1995. V. 100. № D4. P. 7291–7301.
17. Egorova T.A., Rozanov E.V., Zubov V.A., Karol I.L. Model for Investigating Ozone Trends (MEZON) // Physics of Atmosphere and Ocean (Russian Academy of Sciences). 2003. V. 39. № 3, P. 277–292.
18. Киселёв А.А., Кароль И.Л. Как поживаешь, антарктическая озоновая дыра? // Природа. 2016. № 10. С. 3–8.
19. Sukhodolov T., Egorova T., Stenke A., Ball W.T., Brodowsky C., Chiodo G., Feinberg A., Friedel M., Karagodin-Doyennel A., Peter T., Sedlacek J., Vattioni S., Rozanov E. Atmosphere-Ocean-Aerosol-Chemistry-Climate Model SOCOLv4.0: description and evaluation // Geoscientific Model Development. 2021. V. 14. P. 5525–5560.
<https://doi.org/10.5194/gmd-14-5525-2021>
20. Кароль И.Л., Зубов В.А., Розанов Е.В., Розанова И.В., Егорова Т.А., Киселёв А.А., Шмутц В. Моделирование изменений глобального озона и атмосферной динамики в XXI-м веке с помощью химико-климатической модели "SOCOL" // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 3. С. 330–342.
21. Zubov V., Egorova T., Rozanov E., Karol I., Schmutz W. Role of external factors in the evolution of the ozone layer and stratospheric circulation in 21st century // Atmospheric Chemistry and Physics. 2013. V. 13. P. 4697–4706.
www.atmos-chem-phys.net/13/4697/2013/doi:10.5194/acp-13-4697-2013.
22. Karol I.L., Kiselev A.A. Modeling of the tropospheric carbon monoxide distribution in the northern temperate belt // Chemosphere: Global Change Science. 1999. V. 1. № 3. P. 283–300.
23. Kiselev A.A., Karol I.L. Modeling of the long term tropospheric trends of hydroxyl radical for the Northern Hemisphere // Atmospheric Environment. 2000. V. 34. № 29–30. P. 5271–5282.
24. Kiselev A.A., Karol I.L. The ratio between nitrogen oxides and carbon monoxide total emissions as precursors of tropospheric hydroxyl content evolution // Atmospheric Environment. 2002. V. 36. № 39. P. 5971–5981.
25. Кароль И.Л., Озолин Ю.Э., Розанов Е.В., Затевахин М.А., Ожигина Н.А., Раморосон Р. Станкова Е.Н. Численная модель динамических, микрофизических и фотохимических процессов в конвективном облаке // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2000. Т. 36. № 6. С. 778–793.
26. Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Киселёв А.А., Розанов Е.В. Моделирование изменений газового состава и температурного режима атмосферы в результате возможной ядерной войны // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301. № 2. С. 310–313.
27. Кароль И.Л., Озолин Ю.Э., Розанов Е.В., Егорова Т.А. Модель воздействия солнечных протонных вспышек

- шек на ионный и газовый состав мезосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2009. Т. 45. № 6. С. 789–802.
28. *Ozolin, Y., Karol I., Rozanov E., and Egorova T.* A Model of the Impact of Solar Proton Events on the Ionic and Gaseous Composition of the Mesosphere // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2009. V. 45. № 6. P. 737–750. <https://doi.org/10.1134/S0001433809060073>
 29. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press. 3949 p.* https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.
 30. *Frolkis V.A., Karol I.L., Kiselev A.A.* Global warming potential, global warming commitment and other indexes as characteristics of the effects of greenhouse gases on Earth's climate // *Ecological Indicators*. 2002. V. 2. Iss. 1–2. P. 109–121.
 31. *Фролькис В.А., Кароль И.Л.* Моделирование влияния параметров стратосферного аэрозольного экрана на эффективность компенсации парникового потепления глобального климата // *Оптика атмосферы и океана*. 2010. Т. 23. № 8. С. 710–722.
 32. *Киселёв А.А., Кароль И.Л.* Отклик газового состава тропосферы северных умеренных широт на возможный прорыв метана из недр Земли в атмосферу // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2003. Т. 39. № 5. С. 579–588.
 33. *Киселёв А.А., Кароль И.Л.* Возможные последствия высвобождения метана из толщи вечной мерзлоты на территории России // *Сб. “Современные проблемы экологической метеорологии и климатологии”* (под ред. Г.В. Менжулина). СПб.: Наука. 2005. С. 102–113.
 34. *Jagovkina S., Karol I., Zubov V., Lagun V., Reshetnikov A., Rozanov E.* Reconstruction of the Methane Fluxes from the West Siberia Gas Fields by the 3D Regional Chemical Transport Model // *Atmospheric Environment*. 2000. V. 34. № 24. P. 4317–4325.
 35. *Кароль И.Л., Решетников А.И., Зинченко А.В., Яговкина С.В., Лагун В.Е., Парамонова Н.Н.* Исследования эмиссии метана на севере Западной Сибири // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 3. С. 52–64.
 36. *Ивахов В.М., Кароль И.Л., Киселёв А.А., Зинченко А.В., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Лаурилла Т., Аурела М.* Результаты первых камерных измерений потоков метана на гидрометеорологической обсерватории “Тикси” // *Труды ГГО*. 2015. Вып. 576. С. 27–41.
 37. *Ивахов В.М., Кароль И.Л., Киселёв А.А., Зинченко А.В., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Семенец Е.С., Полищук В.Ю.* Наблюдения атмосферной концентрации и потоков метана в Новом Порту (Ямал) // *Труды ГГО*. 2020. Вып. 596. С. 78–95.
 38. *Кароль И.Л., Ожигина Н.А., Розанов Е.В., Фролькис В.А.* Модельные оценки возможных климатических последствий крупных пожаров на нефтяных месторождениях Кувейта // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. № 8. С. 819–827.
 39. *Киселёв А.А., Кароль И.Л., Фролькис В.А.* Моделирование атмосферных последствий крупномасштабных пожаров последних лет в Сибири и на Дальнем Востоке // *Proceedings “Ecological Chemistry” (Moldova, Chisinau)*. 2005. P. 393–400.
 40. *Kattsov V., Källén E., Cattle H., Christensen J., Drange H., Hanssen-Bauer I., Jóhannessen T., Karol I., Räisänen J., Svensson G., Vavulin S.* Future climate change: modeling and scenarios for the Arctic, in *Arctic Climate Impact Assessment (ACIA)* // Cambridge University Press. 2005. P. 99–150.
 41. *Кароль И.Л., Киселёв А.А., Генихович Е.Л., Чичерин С.С.* Сокращение выбросов короткоживущих атмосферных примесей как альтернативная стратегия замедления изменений климата // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2013. Т. 49. № 5. С. 503–522.
 42. *Кароль И.Л.* Введение в динамику климата Земли. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 214 с.
 43. *Кароль И.Л.* Настоящее и будущее атмосферного озона // *Природа*. 1988. № 9. С. 10–19.
 44. *Данилов А.Д., Кароль И.Л.* Атмосферный озон – сенсация и реальность. Л.: Гидрометеиздат. 1991. 119 с.
 45. *Кароль И.Л.* Озонный щит Земли и человек. СПб., Санкт-Петербургская организация о-ва “Знание” России: 1992. 29 с.
 46. *Кароль И.Л., Киселёв А.А.* Озоносфера Земли в опасности // *Экология и жизнь*. 1996. № 1. С. 19–25.
 47. *Александров Э.Л., Кароль И.Л., Ракипова Л.Р., Седунов Ю.С., Хргиан А.Х.* Атмосферный озон и изменения глобального климата. Л.: Гидрометеиздат. 1982. 167 с.
 48. *Александров Э.Л., Израэль Ю.А., Кароль И.Л., Хргиан А.Х.* Озонный щит Земли и его изменения. СПб.: Гидрометеиздат. 1992. 288 с.
 49. *Кароль И.Л., Розанов В.В., Тимофеев Ю.М.* Газовые примеси в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 192 с.
 50. *World Meteorological Organization, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1991, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 25, Geneva, 1992.*
 51. *World Meteorological Organization, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1994, WMO Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 37, Geneva, 1995.*
 52. *Aviation and the Global Atmosphere. IPCC, 1999 / J.E. Penner, D.H. Lister, D.J. Griggs, D.J. Dokken, M. McFarland (Eds.). Cambridge University Press, UK, 373 p.*
 53. *Кароль И.Л., Киселёв А.А.* Атмосферный метан и глобальный климат // *Природа*. 2004. № 7. С. 47–52.
 54. *Киселёв А.А., Кароль И.Л.* Ещё раз про метан // *Природа*. 2015. № 11. С. 9–17.
 55. *Киселёв А.А., Кароль И.Л.* С метаном по жизни. СПб.: Федеральная служба по гидрометеорологии и

- мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Климатический центр Росгидромета. 2019. 73 с.
56. Кароль И.Л. Высотные самолеты и стратосфера. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 48 с.
57. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Нужно ли менять “Бонинг” и “Ту” на ковер-самолет? // Природа. 2001. № 5. С. 60–66.
58. Кароль И.Л. Климатические последствия ядерной войны. Л., Ленингр. орг. о-ва “Знание” РСФСР: 1987. 18 с.
59. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Что несут лесные пожары атмосфере? // Природа. 2007. № 5. С. 40–46.
60. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Край на краю Земли. Арктика и ее климат // Российские полярные исследования. 2016. № 2(24). С. 19–23.
61. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Россия – Terra cognita. Российский климат сегодня // География и экология в школе XXI века. 2019. № 6. С. 6–14.
62. Киселёв А.А., Кароль И.Л. Череда погодных аномалий – случайность или закономерность? // Природа. 2017. № 7. С. 10–16.
63. Киселёв А.А., Кароль И.Л. Поможет ли климату парижское “лекарство”? // Природа. 2017. № 1. С. 14–21.
64. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Климатическая модель: инструмент или игрушка? // Природа. 2009. № 5. С. 25–31.
65. Кароль И.Л., Киселёв А.А. Парадоксы климата. М.: Аст – пресс, 2013. 288 с.

Igor Leonidovich Karol: Seven Decades in the Science

A. A. Kiselev¹, E. V. Rozanov^{2, 3, *}, V. A. Frolkis^{1, 4}, and S. P. Smyshlaev^{3, 5, **}

¹ Voeikov Main Geophysical Observatory, Karbyshev str., 7, Saint Petersburg, 194021 Russia

² Physikalisch-Meteorologisches Observatorium Davos, World Radiation Center, 33 Dorfstrasse, 7260 Davos Dorf, Switzerland

³ Saint-Petersburg State University, Universitetskaya emb., 7/9, Saint-Petersburg, 199034 Russia

⁴ Saint-Petersburg State University of Economy, Sadovaya str., 21, Saint Petersburg, 191023 Russia

⁵ Russian State Hydrometeorological University, Voronezhskaya str., 79, Saint-Petersburg, 192007 Russia

**e-mail: Eugene.Rozanov@pmodwrc.ch

*e-mail: smyshl@rshu.ru

The article describes the contribution of Igor Leonidovich Karol to world and national science. There are three stages of his scientific research – (1) the dynamics of the atmosphere, (2) chemical and radiation processes in the atmosphere, (3) modern climate changes. Attention is paid to the pedagogical activity of I.L. Karol and his contribution to the popularization of science.

Keywords: mathematical modeling, atmospheric chemistry and dynamics, ozonosphere, climate change