

ИЗ РАБОЧЕЙ ТЕТРАДИ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ

Изменение климата проявляется не только вблизи поверхности Земли, но и в значительном диапазоне высот атмосферы. В статье рассматривается ряд важнейших связанных с изменением климата направлений исследований динамических и химических процессов в тропосфере, стратосфере и мезосфере, осуществляемых в России и за рубежом.

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И СРЕДНЯЯ АТМОСФЕРА — ВОПРОСОВ ВСЁ БОЛЬШЕ

П.Н. Варгин, В.А. Юшков, С.М. Хайкин, Н.Д. Цветкова, С.В. Кострыкин, Е.М. Володин

В последние 20 лет во многих странах изменение климата стало одной из основных тем специализированной литературы и средств массовой информации. Причиной этого являются не только глобальный характер изменений и их последствий для социально-экономической деятельности, здоровья человека, состояния флоры и фауны, но и сохраняющиеся неопределённости предсказаний в среднесрочной и долгосрочной перспективе.

Опубликованный в 2007 г. 4-й Оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) обобщил последние достижения науки о наблюдаемых и прогнозируемых изменениях климата в различных регионах в течение XXI в., их последствиях, возможностях адаптации и способах снижения антропогенной нагрузки на климатическую систему Земли. В докладе говорится, что наблюдаемое с середины XX в. повышение глобальной средней температуры вызвано увеличением концентраций антропогенных парниковых газов. Обзор выводов, касающихся изменений основных климатических параметров атмосферы и океана и существующих проблем развития российской

климатической науки, представлен в работе [1]. В конце 2008 г. был опубликован Оценочный доклад Росгидромета, содержащий подробный анализ результатов последних исследований, касающихся различных секторов экономики, флоры и фауны, а также здоровья населения России.

Хотя влияние антропогенных выбросов парниковых газов на климатическую систему у большинства учёных не вызывает сомнений, одной из важнейших задач является зависящий от сценариев развития мировой экономики прогноз изменения этих выбросов в ближайшие десятилетия. К другим задачам относится исследование влияния на климат не зависящих от человека естественных факторов, таких как солнечная активность, сильные извержения вулканов, поглощение и эмиссия парниковых газов Мировым океаном и растительностью. Несмотря на значительный прогресс, сохраняются неопределённости в прогнозах увеличения уровня Мирового океана, изменения облачности, режима осадков, сокращения ледникового покрова, изменения растительности, стока рек, таяния льдов, вечной мерзлоты и др.

При всей широте обсуждения проблемы в подавляющем большинстве случаев её рассмотрение ограничивается нижним слоем атмосферы. При этом известно, что, кроме повышения температуры поверхности Мирового океана и его уровня, большое значение имеют изменение температуры более глубоких слоёв, кислотности, возможная смена циркуляции океана и в первую очередь его термохалинной меридиональной циркуляции, определяющей климат значительной части нашей планеты.

Намного меньше внимания уделяется изучению взаимосвязи изменения климата вблизи поверхности Земли и смены динамических и химических процессов в более высоких слоях атмосферы, в частности, в стратосфере — области с

ВАРГИН Павел Николаевич — кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (ЦАО). ЮШКОВ Владимир Александрович — кандидат физико-математических наук, заведующий отделением физики высоких слоёв атмосферы ЦАО. ХАЙКИН Сергей Михайлович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ЦАО. ЦВЕТКОВА Наталья Дмитриевна — научный сотрудник ЦАО. КОСТРЫКИН Сергей Владимирович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института вычислительной математики РАН. ВОЛОДИН Евгений Михайлович — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник института.

диапазоном высот примерно от 15 до 55 км. За рамками данной публикации остаются направления исследований, развитие которых имеет большое значение для улучшения нашего понимания и совершенствования прогнозирования климатических перемен. К числу этих направлений относится исследование химических процессов в стратосфере, генерации и распространения гравитационных волн, меж- и внутригодовой изменчивости зональной циркуляции и активности планетарных волн, влияния солнечной активности на динамические и химические процессы в средней атмосфере, влияние смены циркуляции атмосферы на состояние ледового покрова в Арктике и другие.

Исследование стратосферы и изменение климата. Для исследований стратосферы в 1992 г. организован проект Всемирной программы по изучению изменения климата ООН “Стратосферные процессы и их влияние на климат” – Stratospheric Processes And their Role in Climates (SPARC). В рамках проекта осуществляются международные программы исследований химических и динамических процессов в стратосфере и тропосфере, их взаимосвязи, стратосферно-тропосферного обмена, изменения химического состава стратосферы, сравнение и совершенствование реализации динамических и химических процессов в климатических моделях общей циркуляции атмосферы. Два раза в год специалисты проекта распространяют информационный бюллетень о последних результатах исследований. Важнейшими событиями стали Генеральные ассамблеи SPARC, последняя из которых с участием более 300 учёных из разных стран прошла в Италии в 2008 г.

Изменение температуры стратосферы – одно из важнейших проявлений климатических изменений (рис. 1). Одновременно с ростом температуры вблизи поверхности Земли температура стратосферы снижается. Данные радиозондирования, лидарных и спутниковых измерений за 1980–2000 гг. показывают, что в нижней стратосфере температура понизилась на 0.5–1 К, в средней стратосфере ~0.5 К и более чем на 2 К за 10 лет в верхней стратосфере и нижней мезосфере, что значительно превышает увеличение температуры вблизи поверхности нашей планеты: ~0.2 К за декаду. Последние исследования свидетельствуют, что снижение глобальной температуры в нижней стратосфере за 1979–2007 гг. составило 0.5 К за декаду, при этом наибольший тренд наблюдается в нижней стратосфере Антарктики в весенние и летние сезоны: 1–1.5 К.

Важнейшими процессами, отвечающими за изменение температуры стратосферы, являются увеличение концентрации парниковых газов и уменьшение содержания стратосферного озона. При поглощении им коротковолновой УФ радиа-

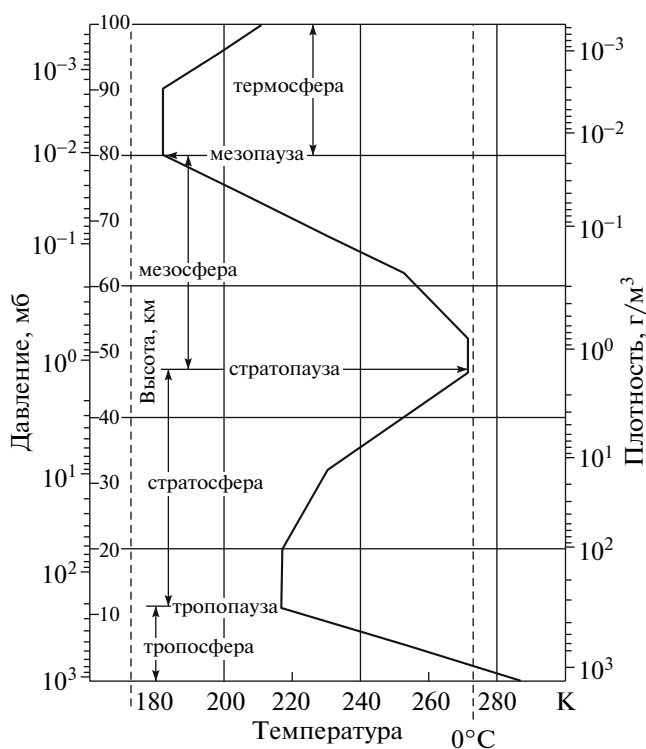


Рис. 1. Вертикальное распределение температуры в атмосфере

ции происходит нагрев стратосферы и на фоне уменьшения содержания стратосферного озона, продолжающегося последние 30 лет, снижается нагрев, а значит, падает температура стратосферы. Увеличение содержания парниковых газов также ведёт к снижению температуры стратосферы из-за усиления радиационного выхолаживания. Результаты моделирования показывают, что снижение температуры определяется уменьшением содержания озона, в то время как в верхней стратосфере оба фактора воздействуют примерно одинаково.

Кроме перечисленных факторов, влияние на температурный режим стратосферы оказывает изменение средней меридиональной циркуляции, состоящей из восходящих движений в тропиках, перемещения воздушных масс в направлении зимнего полюса и нисходящих движений в средних и высоких широтах. За последние годы получено значительное количество результатов моделирования, свидетельствующих об усилении средней меридиональной циркуляции [2]. Оно ведёт к изменению переноса малых газовых составляющих и уменьшению “среднего возраста” воздуха в стратосфере [3]. Усиление циркуляции может быть вызвано изменением зонального ветра, связанного с падением температуры, которое способствует усилению распространения планетарных волн из тропосферы в стратосферу и их

диссипации в тропическом и субтропическом регионах. Одновременно с похолоданием в последние десятилетия во внетропической стратосфере наблюдается рост годового хода температуры [4]. Результаты расчётов климатических моделей, использованных при подготовке 4-го Оценочного доклада, показывают, что в ближайшие десятилетия наибольшее увеличение среднезональной температуры будет в верхней тропической тропосфере, а уменьшение — в стратосфере. Степень снижения температуры зависит от сценария антропогенных выбросов и от состояния стратосферного озона.

Изменение солнечной активности и извержения вулканов также влияют на температуру стратосферы. Установлено, что в тропиках влияние изменения солнечной активности (от максимума до минимума 11-летнего цикла) составляет от ~0.5 К в нижней стратосфере, до ~1.0 К в верхней стратосфере [5]. Последние сильнейшие извержения вулканов Эль-Чичон в Мексике в 1982 г. и Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. привели к росту среднеглобальной температуры нижней стратосферы по данным радиозондов на 0.4–0.6 К, сохранявшегося на протяжении нескольких лет, и к значительному снижению содержания озона.

До последнего времени считалось, что только тропосфера оказывает существенное влияние на имеющую значительно меньшую плотность стратосферу через распространение в ней планетарных и инерционно-гравитационных волн. Планетарные волны возникают в тропосфере вследствие неоднородностей орографии и нагрева поверхности суши и океана, а инерционно-гравитационные волны — при движении воздушных масс вблизи неоднородностей орографии и при образовании конвективных облаков.

В течение последних 10 лет были получены доказательства, основанные на анализе наблюдений и на модельных экспериментах, свидетельствующие о влиянии динамических процессов в стратосфере на тропосферу. Наибольшее внимание исследователей было уделено двум аспектам — состоянию озонного слоя и роли взаимосвязи стратосферы и тропосферы в наблюдаемом и прогнозируемом изменении климата. Важнейшим звеном, связывающим тропосферу и стратосферу, является озонный слой, поскольку существование стратосферы вызвано находящимся в ней максимумом концентрации озона. Интерес представляет изучение влияния изменения климата на восстановление стратосферного озона к уровню начала 1980-х годов (когда было обнаружено значительное разрушение этого слоя в Антарктиде), так и обратного процесса — влияния изменения слоя озона на изменение климата вблизи поверхности Земли.

Как известно, озонный слой полностью поглощает УФ-радиацию области С (100–280 нм) и

заметно ослабляет её в области В (280–315 нм), которая оказывает значительное воздействие на экосистемы, протекание биогеохимических циклов, качество воздуха, здоровье людей и живые организмы. Небольшие дозы УФ-облучения могут действовать благотворно на здоровье человека, формируя витамин D. Повышенные дозы ведут к развитию кожных заболеваний (фотокератоз, рак кожи и др.), заболеваний глаз (фотокератит, катаракта, рак конъюнктивы и др.), ослаблению иммунной системы. Вариации содержания озона могут сильно влиять на уровень УФ-В-радиации у поверхности Земли. В то же время на её уровень влияют и другие факторы: облачность, аэрозоль, альbedo поверхности, некоторые газы (диоксид серы, диоксид азота и др.). Поэтому оценки изменчивости УФ-радиации будут связаны не только с влиянием вариаций озонного слоя, но и с глобальными климатическими изменениями.

Тепло, выделяемое при поглощении озоном УФ-радиации, — основной источник энергии для циркуляции стратосферы. Озон также вносит вклад в радиационное выхолаживание, излучая длинноволновую радиацию, но по силе выхолаживания значительно уступает двуокиси углерода.

Современное представление о процессах, ответственных за изменение стратосферного озона, базируется на результатах лабораторных исследований химических реакций, непосредственных наблюдениях и спутниковых измерениях, а также на результатах моделирования. Достижения в исследовании озонного слоя послужили основой заключения Венской конвенции об охране озонного слоя в 1986 г. и Монреальского протокола в 1987 г., ограничивших производство озоноразрушающих веществ (ОРВ) — антропогенных парниковых газов. Благодаря действию в течение последних 20 лет этих договоров, содержание ОРВ в стратосфере снижается, и сейчас, по мнению некоторых учёных, атмосфера находится вблизи “точки перелома” — изменения тренда от уменьшения озонного слоя к его восстановлению. Наблюдаемое снижение температуры стратосферы влияет на восстановление слоя: с одной стороны, замедляется скорость разрушающих озон газофазных реакций в верхней стратосфере, с другой — усиливается разрушение озона в зимне-весенние сезоны в полярных областях в нижней стратосфере в ходе гетерогенных реакций на частицах полярных стратосферных облаков.

На предполагаемое восстановление стратосферного озона, кроме изменения содержания парниковых газов (включая водяной пар), усиления меридиональной циркуляции, может повлиять и наблюдаемая последние 20 лет тенденция к усилению холодных зим в стратосфере (а следовательно, и разрушения озона) в Арктике [6]. Эта тенденция подтверждается получаемыми в Центральной аэрологической обсерватории на протя-

жении последних 10 лет ежегодными оценками химического разрушения озона внутри стратосферного полярного вихря в Арктике [7]. Истощение озонового слоя, вызванное антропогенными факторами, наиболее заметно в Арктике и Антарктике внутри полярного циклона в зимне-весенний период. Этот процесс имеет большое значение для состояния окружающей среды, так как может вызвать заметное увеличение уровня УФ радиации, что, в свою очередь, приведёт к негативным последствиям для здоровья человека и состояния экосистемы в целом. Так, в Антарктиде весенний максимум УФ-индексов значительно превышает максимальные значения индексов тропических регионов. Важно отметить, что, в отличие от антарктического полярного циклона, арктический часто смещается от полюса в область густонаселённых средних широт, и к концу зимне-весеннего периода, когда величина химических потерь озона внутри полярного стратосферного вихря становится максимальной, он, как правило, располагается над Европейской частью России и Сибири.

Интенсивность образования полярных стратосферных облаков (ПСО) в Арктике и Антарктике определяется температурой нижней стратосферы: в холодные зимы внутри стратосферного полярного вихря образуется значительно больше ПСО, чем в более тёплые. Чаще всего величину ПСО характеризуют их объёмом. На поверхности частиц ПСО в присутствии солнечного света происходит активация озоноразрушающих веществ с последующим интенсивным химическим разрушением озона. Таким образом, в зимние сезоны с более низкими температурами полярной стратосферы образуется больше ПСО и химическое разрушение озона сильнее (рис. 2).

Более точное описание взаимного влияния изменения озонового слоя и климата является важнейшей задачей совершенствования моделирования климата. При проведении расчётов с использованием климатических моделей в рамках подготовки 4-го Оценочного доклада состояние и изменение озонового слоя задавались по-разному. Так, при моделировании будущего климата в одних моделях состояние озонового слоя сохранялось постоянным, в других учитывалось предполагаемое восстановление озона к уровню начала 1980-х годов, в третьих связанное с озоном радиационное воздействие не учитывалось. В модельных расчётах наблюдаемого климата, начиная с 1979 г., использовались различные параметризации распределения озона, составленные на основе анализа спутниковой информации.

В настоящее время в рамках SPARC создаётся база ежемесячных среднезональных данных вертикального распределения озона с 1979 по 2006 г., которая будет применяться при подготовке следующего доклада МГЭИК для использования моделями, не имеющими собственных блоков расчёта

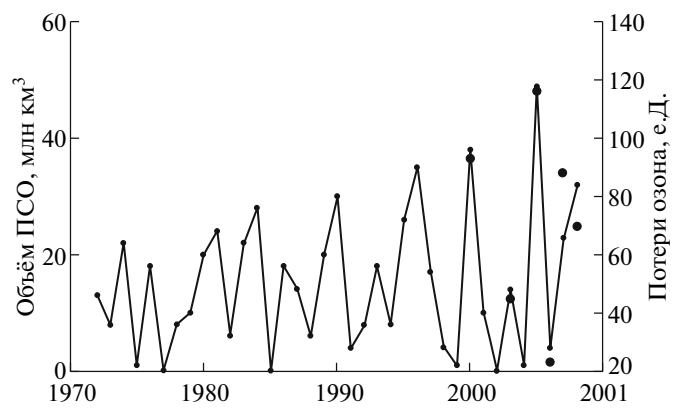


Рис. 2. Межгодовая изменчивость объёма полярных стратосферных облаков с 1972 по 2008 г. и полученные в ЦАО оценки химического разрушения общего содержания озона в полярном циклоне в Арктике в течение зимних сезонов с 2000 по 2008 г. (жирные точки)

озона (в качестве внешнего параметра) и модели, имеющими такие блоки с целью валидации рассчитываемых значений. Рассматриваются возможности дальнейшего расширения этой базы на основной период модельных расчётов с 1850 до 2150 г., для учёта долготных неоднородностей распределения озона, а также создания различных вариантов баз данных, включающих, например, только естественную изменчивость озона (влияние солнечной активности, квазидвухлетнего цикла колебаний экваториального ветра, извержений вулканов) и одновременно учитывающих естественную и антропогенную изменчивость. Вертикальное разрешение данных озона будет составлять ~1 км от поверхности Земли и до высот мезосферы (~70 км).

До последнего времени считалось, что изменчивость стратосферы обусловлена изменчивостью проникающих в неё планетарных волн, возникающих в тропосфере. За последние годы установлено, что изменчивость циркуляции стратосферы оказывает большое влияние на распространение планетарных волн. Другими словами, существует динамическая взаимосвязь между тропосферой и стратосферой: стратосферные процессы воздействуют на распространение из тропосферы планетарных волн, которые в свою очередь влияют на циркуляцию стратосферы. При этом изменение динамики стратосферы может действовать на циркуляцию тропосферы, например, через отражение планетарных волн и их последующее распространение в тропосферу.

Важнейшим примером динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы являются основные моды климатической изменчивости, которые охватывают в обоих полушариях диапазон высот стратосферы и тропосферы до поверхности Земли, изменение которых характеризует

наблюдаемые региональные климатические перемены. Так, Северо-Атлантическое колебание (САК), определяемое разностью атмосферного давления в области исландского минимума и Азорского антициклона, формирует колебание интенсивности западного переноса. Положительная фаза САК, характеризующаяся сильным и устойчивым стратосферным полярным вихрем в Арктике, связана с сильными зональными ветрами особенно над Атлантикой, что приводит к усилению циклонической активности над севером Атлантики. В это время погода Северной Европы и большей части Америки более теплая и влажная, а в Южной Европе более сухая, чем в течение отрицательной фазы САК. Установлена связь фазы САК и приземной температуры большей части Европейской России в зимние месяцы. Наблюдавшийся в 1960–1990 гг. сильный тренд в сторону положительной фазы соответствовал зимнему потеплению в России (с максимумом в европейской части) в последние десятилетия XX в. Другой изменчивостью климата является Тихоокеанское колебание, которое в масштабах десятилетий характеризует смену атмосферных и океанических параметров в Тихоокеанском–Северо-Американском регионе.

Исследование внезапных стратосферных потеплений. Обнаруженные в 1952 г. внезапные стратосферные потепления (ВСП) являются одним из ярких примеров динамического взаимодействия тропосферы и стратосферы. Происходящие в течение зимнего – начале весеннего сезона в Арктике и Антарктике ВСП характеризуются быстрым и значительным увеличением (за несколько суток на десятки градусов) температуры полярной стратосферы, уменьшением скорости зонального ветра и изменением его направления, нарушением изолированности, ослаблением, а в некоторых случаях и разделением стратосферного полярного вихря. Возникновение ВСП связано с взаимодействием распространяющихся из тропосферы в стратосферу планетарных волн и зональной циркуляции, которому предшествуют периоды интенсивного распространения планетарных волн из тропосферы в стратосферу в средних и высоких широтах. Если в обычное время большая часть проникающих в стратосферу планетарных волн в результате взаимодействия с зональными ветрами перенаправляется к экватору, то перед ВСП, благодаря особым условиям циркуляции в стратосфере, идёт их перенаправление к полюсу.

Долгое время считалось, что ВСП – исключительно стратосферные, не влияющие на тропосферу явления. Однако за последние 12 лет было установлено, что связанные с ВСП изменения динамики могут распространяться из стратосферы на тропосферу [8]. Эти результаты были подтверждены модельными расчётами [9]. Более 20 лет

назад МакГирик и Дуглас показали, что связанные с ВСП изменения динамики стратосферы приводят к значительным аномалиям погоды в США в январе–феврале, в том числе развитию сильных блокирующих антициклонов и снижению на 25% циклонической активности [10]. В дальнейшем эти результаты получили развитие: например, по мнению Томпсона и других исследователей, эпизоды значительного ослабления стратосферного полярного вихря в Арктике часто предшествуют аномально холодным погодным условиям (на период до 2 месяцев) в густонаселённых районах на востоке Северной Америки, а также в Северной Европе и Восточной Азии [11]. В частности, Кодера предположил, что после ВСП в Арктике в марте 2007 г. изменение характера распространения планетарных волн и их отражение из стратосферы в тропосферу привели к экстремальным холодным погодным условиям над северо-востоком Северной Америки [12]. Исследование связи стратосферных процессов и аномально холодных погодных условий проводилось и в России [13].

Влияние ВСП на циркуляцию стратосферы и тропосферы не ограничивается средними и высокими широтами. Установлено, что ВСП в Арктике могут вызвать охлаждения тропосферы в экваториальном регионе из-за усиления меридиональной циркуляции. Анализ ВСП в Арктике с 1979 г. до 2003 г. показал, что из-за них происходит уменьшение температуры и усиление конвективных процессов в экваториальной нижней стратосфере – верхней тропосфере. Этот эффект был зафиксирован и после главного ВСП в Антарктике в сентябре 2002 г. [14]. Установлено, что значительные изменения стратосферного полярного вихря в Арктике могут опережать примерно на 2 месяца изменения тропосферной циркуляции [15].

Возникновению ВСП в полярных широтах могут способствовать особые условия циркуляции (например, низкочастотные колебания зональной циркуляции), взаимодействие волн различных масштабов, в частности, волновые пакеты, появление которых может быть связано с конвективными процессами в экваториальных и тропических широтах. Распространяясь в направлении средних широт, эти волновые пакеты могут привести к усилению антициклонов и усилению распространения планетарных волн из тропосферы в стратосферу, как это было показано при исследовании ВСП 2002 г. в Антарктике [16]. Отметим, что сильнейшему из всех наблюдавшихся в Антарктике и Арктике ВСП 2002 г. посвящён ряд исследований, основанных на анализе данных наблюдений и результатах моделирования [17].

Динамическая взаимосвязь тропосферы и стратосферы в случае ВСП проявляется следующим образом: тропосферные процессы влияют на стратосферу (могут способствовать возникнове-

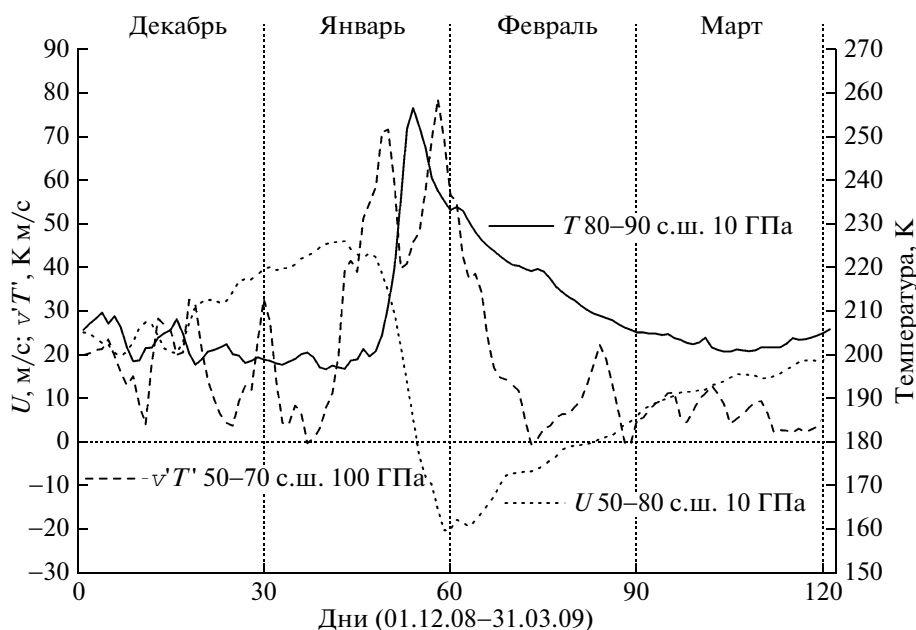


Рис. 3. Изменение среднезональной температуры, осреднённой по области 80–90° с.ш. на 10 ГПа (~32 км) (сплошная линия, шкала справа), среднезонального зонального ветра U (м/с), осреднённого по области 50–80° с.ш. на 10 ГПа (пунктир) и среднезонального меридионального потока тепла $\bar{v}'T'$ (К м/с), осреднённого по области 50–70° с.ш. на 100 ГПа (~16 км) (точки) с 1 декабря 2008 г. по 31 марта 2009 г. (для двух последних параметров – шкала слева)

нию ВСП), после чего стратосферные процессы могут оказать значительное воздействие на динамику тропосферы. В качестве примера на рисунке 3 представлено изменение среднезональной температуры в полярных широтах, среднезонального ветра в области 50–80° с.ш. на высоте ~32 км, а также среднезонального меридианального потока тепла – индикатора распространения планетарных волн из тропосферы в стратосферу в области 50–70° с.ш. на высоте ~16 км в течение зимы 2008/09 гг. Видно, что с 16 по 22 января 2009 г. в результате одного из самых сильных ВСП в Арктике за последние годы температура полярной стратосферы выросла больше чем на 50 К, скорость зонального ветра изменилась от +45 до –20 м/с, сменив направление с западного на восточное. В результате полярный вихрь значительно ослаб и разделился на две части. Столь сильное увеличение температуры привело к значительно меньшему образованию полярных стратосферных облаков и, как результат, – общее за зиму 2008/09 гг. химическое разрушение озонового слоя в Арктике было одним из самых малых за последние годы. Отметим, что наступлению ВСП предшествовало (на ~5–8 суток) характерное резкое увеличение распространения планетарных волн в высоких северных широтах из тропосферы в стратосферу, характеризующее среднезональным меридиональным потоком тепла на 100 ГПа (~16 км).

Необходимо отметить, что ВСП как в Арктике, так и в Антарктике различаются по интенсивности

и продолжительности, а значит, и по последствиям для динамических и химических процессов в стратосфере–тропосфере полярных регионов. Важным вопросом является исследование динамических факторов, определяющих силу ВСП, например, способствующих распространению ВСП в тропосферу. Используя данные Европейского центра прогнозов [18], был проведён композитный анализ наблюдавшихся ВСП в Арктике с 1957 по 2002 г., показавший, что проникновению ВСП в тропосферу способствует большая интенсивность планетарной волны с зональным волновым числом $k = 2$ в период развития ВСП по сравнению с теми ВСП, сигнал которых не распространяется в тропосферу.

В настоящее время не все климатические модели общей циркуляции охватывают весь диапазон высот стратосферы, значительная часть моделей ограничена уровнем 10 гПа (~32 км). Результаты сравнения воспроизведения ВСП в расчётах с использованием климатических моделей, охватывающих диапазон высот стратосферы с достаточным разрешением по вертикали, показали, что хотя отдельные ВСП в большинстве моделей воспроизводятся достаточно хорошо, имеются значительные расхождения в воспроизведении частоты ВСП по сравнению с наблюдениями [19].

Изучение стратосферно-тропосферного обмена имеет большое значение для понимания процессов переноса и связано с проблемами климатических изменений. Так, массообмен через тропопаузу

определяет перенос озоноразрушающих компонентов в стратосферу и вертикальное распределение таких ключевых климатообразующих компонентов, как озон и водяной пар. Поскольку тропопауза представляет собой полупроницаемый динамический барьер, влажный тропосферный воздух проникает в стратосферу, а богатый озоном стратосферный воздух оказывается в тропосфере. В соответствии с глобальной меридиональной циркуляцией воздушные частицы из тропосферы поднимаются в стратосферу в тропических широтах, в то время как стратосферный воздух опускается в тропосферу в высоких широтах. Однако массообмен через тропопаузу происходит и в региональном масштабе в средних широтах на границах циклонов и антициклонов.

Максимальные потоки синоптического масштаба наблюдаются зимой, в период наибольшей активности планетарных волн. Результаты исследования корреляции трассёров в районе тропопаузы свидетельствуют о наличии слоя смешивания, характеризующегося присутствием воздушных масс тропосферного и стратосферного происхождения [20]. Анализ одновременных баллонных измерений озона и водяного пара и траекторный анализ в области наблюдений показали, что слой смешивания в высоких широтах расположен над тропопаузой (до ~2.5 км) [21]. Если в стратосфере глубина массообмена не превышает толщину слоя смешивания, то в тропосфере она значительно больше из-за интенсивных вертикальных движений. Квазигоризонтальный обмен через тропопаузу идёт в местах её наклона. Результаты траекторного моделирования показывают, что максимальные потоки через тропопаузу наблюдаются зимой и имеют преобладающее направление из стратосферы в тропосферу.

Исследования водяного пара. Благодаря своим радиационным и химическим свойствам водяной пар – важнейший естественный парниковый газ атмосферы. Антропогенный вклад в его содержание составляет менее 1%. Распределение водяного пара неравномерно как по земному шару, так и по высоте и определяется главным образом температурой воздуха. Время жизни водяного пара в атмосфере достаточно мало и составляет порядка 10 суток. Он вносит значительный вклад в парниковый эффект, при этом с ростом температуры происходит увеличение содержания водяного пара в атмосфере, усиливается парниковый эффект, что способствует дальнейшему увеличению температуры. Кроме того, водяной пар влияет на радиационный баланс атмосферы (а значит, и на климат) через изменение облачности и режима осадков.

В полярной стратосфере водяной пар особенно важен для химических процессов, влияющих на озонный слой. Активация разрушающих озон соединений происходит на частицах полярных

стратосферных облаков. Скорость их образования зависит от температуры и влажности. Возможное увеличение содержания водяного пара в полярной стратосфере может привести к усилению разрушения озона в зимне-весенние сезоны в Арктике и Антарктике. Водяной пар также имеет значение для химического состава атмосферы в качестве источника радикала ОН – важного окислителя парниковых газов (в том числе метана).

Согласно последним исследованиям, количество водяного пара в тропосфере увеличивается, особенно над океанами: с 1988 по 2004 г. общее содержание в вертикальном столбе росло со скоростью $1.2 \pm 0.3\%$ за декаду, что приводило к росту количества влаги для осадков. В верхней тропосфере точно оценить долговременные изменения значительно сложнее, однако данные подтверждают глобальное повышение содержания водяного пара за последние два десятилетия. В этой связи баллонное зондирование, самолётные и спутниковые исследования водяного пара имеют важное значение для улучшения понимания как возможного изменения его содержания в тропосфере и стратосфере, так и особенностей процессов его переноса из тропосферы в стратосферу. Учитывая роль водяного пара в радиационном балансе и химическом составе стратосферы, точные предсказания влияния изменений климата на эволюцию водяного пара невозможны без детального понимания процессов. В то же время ключевую роль для корректного описания переноса влаги из тропосферы в стратосферу играют высокоточные измерения концентрации водяного пара в области верхней тропосферы и нижней стратосферы. Такие измерения, проводимые с высоким пространственным разрешением, представляют собой сложную техническую задачу. Отметим, что спутниковые наблюдения, имеющие глобальное покрытие, но низкое пространственное разрешение не способны воспроизводить тонкую вертикальную структуру поля влажности в области тропопаузы.

В последние годы прогресс в понимании механизмов формирования вертикального распределения водяного пара достигнут на основе результатов измерений влажности верхней тропосферы и нижней стратосферы с помощью оптического флуоресцентного гигрометра Flash, разработанного в Центральной аэрологической обсерватории. Flash зарекомендовал себя наилучшим образом во время международных самолётных и аэростатных полевых исследований, например, в Западной Африке в 2006 г., в Коста-Рике в 2007 г., а также в Финляндии в 2008 и 2009 г. Отметим, что сейчас в мире используется в основном два баллонных гигрометра – российский Flash [21] и американский NOAA.

С помощью российского гигрометра нами впервые были получены натурные свидетельства конвективного увлажнения нижней тропической

стратосферы. Механизм этого процесса может иметь существенное значение в глобальном масштабе, однако оценка его относительного вклада в стратосферный бюджет влажности требует дальнейших исследований. Изучение этого и других механизмов тропосферно-стратосферного обмена очень важно, так как от достоверности и точности параметризации процессов, определяющих влажность стратосферы, зависят результаты модельных расчётов по предсказанию климатических изменений. В настоящее время в климатических моделях процессы масштаба меньшего, чем пространственное разрешение модели (конвективный перенос, турбулентная диффузия, образование облаков и осадков), точно не воспроизводятся, а параметризуются с использованием эмпирических зависимостей, основанных на данных наблюдений.

Взаимосвязь тропосферы и стратосферы. На больших временных периодах существуют несколько динамических процессов в стратосфере, влияющих на тропосферу. Среди них отметим квазидвухлетние колебания зонального ветра в стратосфере, которые из тропиков распространяются через всю тропосферу и влияют на циркуляцию стратосферы средних и высоких широт.

Стратосферное квазидвухлетнее колебание (КДК) скорости ветра проявляется в том, что на высотах 20–30 км в окрестностях экватора ветер дует с запада на восток примерно в течение года, а затем примерно в течение года-полтора – с востока на запад. Это явление лишь в последние годы удалось воспроизвести в моделях климата. Если проанализировать данные наблюдений за последние 50 лет, то окажется, что КДК влияет на погоду у поверхности Земли. Так, зимой в западной фазе КДК в умеренных широтах Северного полушария скорость западного ветра у поверхности Земли в среднем немного больше, а значит, и температура на большей части России немного выше, чем в восточной фазе. Но следует помнить, что это влияние не слишком сильное, и прогнозировать, какой будет зима, например, в Москве, используя только данные о фазе КДК, нельзя.

Другим примером является выброс и распространение по стратосфере аэрозоля после мощных извержений вулканов. Значительное увеличение содержания аэрозоля в стратосфере после извержений привело к уменьшению достигающей Земли солнечной радиации и снижению глобальной среднегодовой температуры. Именно на этом эффекте базируется один из методов по сдерживанию будущего глобального потепления Земли, согласно которому необходимо забросить в стратосферу определённое количество аэрозольных частиц. Исследования по этой тематике проводятся в Институте глобального климата и экологии Росгидромета и РАН [22], а также с использованием лучших в России климатических

моделей – совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана в Институте вычислительной математики РАН, модели промежуточной сложности общей циркуляции атмосферы Института физики атмосферы РАН [23] и модели общей циркуляции атмосферы Главной геофизической обсерватории Росгидромета [24]. Данное направление исследований развивается также в США и Германии, в том числе под руководством нобелевского лауреата по химии профессора П. Крутцена [25–27].

Приведём ещё несколько примеров стратосферных процессов, влияющих на тропосферу, в том числе и на приземную погоду и климат. Согласно данным наблюдений, в последние десятилетия увеличивается скорость западного ветра в умеренных широтах обоих полушарий. Именно этим в основном объясняются тёплые зимы в России в последние 10–20 лет по сравнению с предшествующими годами. В южном полушарии одной из причин усиления приземных западных ветров в умеренных широтах является уменьшение содержания озона в высоких широтах. Согласно Оценочному докладу, в моделях климата, учитывающих истощение озонового слоя в стратосфере над Антарктикой в последние десятилетия, усиление западных ветров в южном полушарии получилось близким наблюдаемому, а в тех моделях, где это учтено не было, усиление западных ветров или вообще не происходило, или происходило медленнее, чем по данным наблюдений. В то же время аналогичное явление в Северном полушарии пока не получило объяснения.

Современные модели климата – это не только модели динамики и термодинамики атмосферы и океана, как было, скажем, 10 лет назад. Они становятся всё более полными моделями земной системы, учитывающими многочисленные процессы взаимодействия атмосферы, океана и подстилающей поверхности. В них рассчитываются, например, температура, влажность и промерзание почвы до глубины 10–50 м, процессы фотосинтеза и дыхания растений, накопление их массы, химический баланс почвы и масса гумуса, образование метана в болотах и его поток в атмосферу, баланс углерода в океане, химические реакции в атмосфере. Чтобы правильно воспроизвести газовый состав и распределение температуры в стратосфере и тропосфере, необходимо корректно моделировать концентрацию озона, водяного пара, метана, аэрозолей и других газовых составляющих. Для этого современные модели учитывают более сотни химических реакций, имеющих очень различающиеся характерные времена, поэтому компьютерное время, необходимое для расчёта химических реакций, может быть значительно больше, чем время, затрачиваемое на расчёт динамики атмосферы. Однако только такие модели могут предсказать будущие

изменения климата и газового состава атмосферы и доказать или опровергнуть целесообразность того или иного искусственного воздействия на климат.

Ракетное зондирование средней атмосферы. Начиная с середины 1960-х годов, большая часть исследований средней атмосферы была связана с получением данных метеорологических ракет или с ракетным зондированием атмосферы (РЗА). Во времена СССР РЗА осуществлялось с наземных станций в Астраханской области, на острове Хейса (Земля Франца-Иосифа), с полигонов в Монголии, Индии, Болгарии, ГДР и Антарктиды, а также с научно-исследовательских судов в различных регионах Мирового океана. Центральная аэрологическая обсерватория была центром проведения зондирования, обработки и анализа данных. За 50 лет в нашей стране накоплен уникальный опыт использования метеорологических ракет для исследования термодинамических параметров средней атмосферы (вертикальные профили температуры, давления, ветра) и её состава (озон, водяной пар, окислы азота, электронная и ионная концентрация и аэрозоль) в различных регионах Земли в разные сезоны и при различных гелио- и геофизических условиях.

Полученные сведения легли в основу справочных моделей атмосферы, используемых для решения задач физики атмосферы, климата средней атмосферы и ряда прикладных задач. Была создана база данных для анализа физических механизмов атмосферных процессов и построения теоретических и эмпирических моделей атмосферы. Одним из важнейших научных открытий, полученных на основе анализа многолетних данных РЗА, является обнаружение отрицательного тренда температуры в мезосфере — до 5–7 К за декаду [28–30]. При этом амплитуда “сигнала” о похолодании мезосферы в несколько раз больше, чем значение положительного температурного тренда на поверхности Земли. Такой сигнал легче детектировать, а значит, он может использоваться в качестве индикатора глобальных изменений климата. Обнаруженные отрицательные тренды температуры в мезосфере подтверждены другими независимыми измерениями. Согласно некоторым результатам моделирования, подобный тренд связан с увеличением концентрации в атмосфере парниковых газов. Таким образом, термодинамический режим мезосферы может являться важным предиктором изменения климатических характеристик на поверхности Земли. Кроме мониторинга температуры, скорости и направления ветра, давления, плотности стратосферы и мезосферы, РЗА используется для измерения концентрации электронов в нижней ионосфере и малых газовых составляющих, а также валидации спутниковых, наземных радарных и лидарных измерений.

Быстрое развитие за последние 20 лет спутниковых методов наблюдения даёт возможность получать значительное количество данных о структуре, составе, динамике средней атмосферы на регулярной основе и с глобальным покрытием (что является преимуществом по сравнению с РЗА). Несмотря на это, с помощью РЗА можно восстановить вертикальные профили параметров атмосферы и её состава с разрешением, которое не способны обеспечить спутниковые методы. Поэтому, несмотря на высокую стоимость, РЗА развиваются в странах Европейского союза, Японии и США, Канаде, а в последние годы и в Бразилии. Среди объектов ракетных исследований, проводимых в странах ЕС, — гравитационные волны и связанную с ними турбулентность, вертикальную структуру которых можно изучать только на основе РЗА, а также самые высокие облака земной атмосферы, образующиеся на высотах верхней мезосферы (~80–85 км) в Северном и Южном полушариях в области широт 50–70°. В ионосфере РЗА используется для исследования плазменных волн и процессов неустойчивости, что важно для улучшения качества приёма и анализа помех GPS-навигации, особенно в северных широтах, где ионосферные возмущения вносят значительные ошибки в навигацию.

В нашей стране основные исследования динамических процессов и химического состава средней атмосферы шли главным образом в двух институтах Росгидромета — в Центральной аэрологической обсерватории, в Институте прикладной геофизики, а также в Институте физики атмосферы РАН. В связи с прекращением финансирования в 1995 г. ракетное зондирование в России было полностью остановлено. Перестали функционировать и станции зондирования в Болгарии, ГДР и Монголии. Только в последние годы в Росгидромете возобновлено РЗА. После перерыва больше чем 10 лет прошла серия запусков на острове Хейса. Сейчас в ЦАО разрабатывается новый метеорологический ракетный комплекс с высотой подъёма научной аппаратуры до 100 км. Предполагается измерение концентрации электронов, температуры, давления, плотности, скорости и направления ветра. В дальнейшем возможны дополнительные измерения потоков протонов с энергиями от 1 до 10 МэВ, электронов с энергиями от 30 до 500 кэВ, рентгеновских лучей в диапазоне длин волн от 1 до 10 нм, вертикального распределения озона (с помощью УФ-спектрометра), аэрозоля, водяного пара и некоторых других малых газовых составляющих.

В рамках возрождения российских ракетных исследований средней атмосферы предусмотрено создание более экономичных мобильных исследовательских ракетных комплексов с малыми зонами опасности падения отработавших ракетных

двигателей. Это позволит вести ракетные исследования в любых регионах.

Наблюдаемые и прогнозируемые климатические изменения влияют на все компоненты климатической системы Земли, и это влияние в ближайшие десятилетия будет усиливаться. Сейчас основным инструментом, позволяющим исследовать климатические изменения, является численное моделирование с использованием глобальных климатических моделей общей циркуляции атмосферы и океана. Именно результаты моделирования легли в основу планирования мер по снижению антропогенной нагрузки на климатическую систему Земли и разработки адаптационных мероприятий к последствиям меняющегося климата.

Произошедшее за последние годы развитие климатических моделей позволило существенно улучшить воспроизведение различных взаимосвязанных динамических и химических процессов в атмосфере, на поверхности суши и в океане, уточнить роль естественных и антропогенных факторов в наблюдаемых климатических изменениях. Однако ряд вопросов по-прежнему требует повышенного внимания учёных. Важнейшим среди них является совершенствование моделирования естественной изменчивости тропосферы и стратосферы, многие динамические и химические процессы в которых взаимосвязаны, и их изменчивости, обусловленной изменениями климата.

По нашему мнению, к числу актуальных задач исследований, решение которых будет способствовать совершенствованию моделирования климата, необходимо отнести изучение динамической взаимосвязи процессов в тропосфере и стратосфере, стратосфере и мезосфере и их влияния на химические процессы в этих областях атмосферы. Результаты исследований многих учёных в разных странах за последние 10 лет подтверждают важность изучения и учёта при моделировании климата химических и динамических процессов в тропо-, страто- и мезосфере.

Происходящие изменения в средней атмосфере являются отражением наблюдаемых климатических изменений вблизи поверхности Земли и также связаны с увеличением концентрации парниковых газов. Таким образом, изучение этих изменений (аналогично исследованиям изменений климата вблизи поверхности Земли) будет способствовать расширению наших знаний о наблюдаемых и ожидаемых в будущем изменениях глобального климата. Средняя атмосфера с расположенным внутри неё озоновым слоем должна стать одним из важнейших объектов исследований российских учёных и может рассматриваться как индикатор процессов изменений климата.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ 09-05-13551-офи_ц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулёв С.К., Катцов В.М., Соломина О.Н. Глобальное потепление продолжается // Вестник РАН. 2008. № 1.
2. Garsia R., Randel W. Acceleration of Brewer-Dobson circulation due to increase in greenhouse gases // J. Atmos. Sci. 2008. V. 65.
3. Garcia R., Marsh D., Kinnison D., Boville B., Sassi F. Simulation of secular trends in the middle atmosphere, 1950–2003 // J. Geophys. Res. 2007. V. 112.
4. Semenov A.I., Shefov N.N., Lysenko E.V. et al. The Seasonal Peculiarities of Behavior of the Long-Term Temperature Trends in the Middle Atmosphere at the Mid-Latitudes // Phys. Chem. Earth. 2002. V. 27.
5. Randel W., Shine K., Austin J. et al. An update of observed stratospheric temperature trends // J. Geophys. Res. 2009. V. 114.
6. Rex M. et al. Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33.
7. Цветкова Н.Д., Юшков В.А., Лукьянов А.Н. и др. Рекордное химическое разрушение озона в Арктике зимой 2004/2005 год // Известия РАН. Физика Атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 5.
8. Baldwin M., Dunkerton T. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere // J. Geophys. Res. 1999. V. 104.
9. Taguchi M. Tropospheric Response to Stratospheric Sudden Warmings in a Simple Global Circulation Model // J. of Climate. 2003. V. 16. № 18.
10. McGuiirk J., Douglas D. Sudden Stratospheric Warming and Anomalous U.S. Weather // Mon. Weather Rev. 1988. V. 116.
11. Thompson D., Lee S., Baldwin M. Atmospheric processes governing the Northern Hemisphere annular mode / The North Atlantic Oscillation. 2002.
12. Kodera K., Mukougawa H., Itoh S. Tropospheric impact of reflected planetary waves from the stratosphere // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35.
13. Жадин Е.А., Зюляева Ю.А., Володин Е.М. Связи межгодовых вариаций стратосферных потеплений, циркуляции тропосферы и температуры поверхности океанов Северного полушария // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 5.
14. Eguchi N., Kodera K. Impact of the 2002, Southern Hemisphere, stratospheric warming on the tropical cirrus clouds and convective activity // Geophys. Res. Lett. 2007. V. 34.
15. Baldwin M., Dunkerton T. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. // Science. 2001. V. 294.
16. Peters D., Vargin P., Kornich H. A Study of the Zonally Asymmetric Tropospheric Forcing of the Austral Vortex Splitting During September 2002 // Tellus. 2007.
17. Варгин П.Н., Жадин Е.А. Влияние стратосферного потепления на антарктическую озоновую дыру 2002 года // Метеорология и гидрология. 2004. № 8.
18. Nakagawa K., Yamazaki K. What kind of stratospheric sudden warming propagates to the troposphere? // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33.

19. *Charlton A., Polvani L.* A New Look at Stratospheric Sudden Warmings. Part I: Climatology and Modeling Benchmarks // *J. Climate*. 2007. V. 20. № 3.
20. *Hoor P., Fischer H., Lange L. et al.* Seasonal variations of a mixing layer in the lowermost stratosphere as identified by the CO-O₃ correlation from in situ measurements // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107.
21. *Лукьянов А.Н., Карпечко А.Ю., Юшков В.А. и др.* Оценки переноса водяного пара, озона в верхней тропосфере—нижней стратосфере и потоков через тропопаузу в полевой кампании на ст. Соданкюла (Финляндия) // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2009. Т. 45. № 3.
22. *Израэль Ю.А., Захаров В.М., Петров Н.Н. и др.* Натурный эксперимент по исследованию прохождения солнечного излучения через аэрозольные слои // *Метеорология и гидрология*. 2009. № 5.
23. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А.* Предотвращение глобального потепления с помощью контролируемых эмиссий аэрозолей в стратосфере: глобальные и региональные особенности отклика температуры по расчётам с КМ ИФА РАН // *Оптика атмосферы и океана*. 2009. Т. 22. № 6.
24. *Мелешко В.П., Кароль И.Л., Катцов В.М. и др.* Реакция равновесного климата на преднамеренную эмиссию стратосферного аэрозоля, рассчитанная по глобальной модели атмосферы и верхнего слоя океана // *Труды ГГО*. 2009. № 558.
25. *Crutzen P.* Albedo enhancement by stratospheric sulfur injection: a contribution to resolve a policy dilemma? // *Climate Change*. 2006. V. 77.
26. *Matthews H., Caldeira K.* Transient climate-carbon simulations of planetary geoengineering // *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2007. V. 104. № 24.
27. *Brovkin V., Petoukhov V., Claussen M. et al.* Geoengineering climate by stratospheric sulfur injections: Earth system vulnerability to technological failure // *Climatic Change*. 2009. V. 92.
28. *Kokin G., Lysenko E.* On temperature trends of the atmosphere from rocket and radiosonde data // *J. Atmos. Terrestrial. Physics*. 1994. V. 56. № 9.
29. *Лысенко Е.В., Нелидова Г.Г., Простова А.М.* Изменения термического режима страто- и мезосферы в течение последнего 30-летия // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 1997. Т. 33. № 2.
30. *Лысенко Е.В., Русина В.Я.* Изменения термического режима страто- и мезосферы в течение последнего 30-летия // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 2002. Т. 38. № 3.