

DOI: 10.7868/S0869587315010181

В предлагаемой вниманию читателей статье рассказывается о наиболее актуальных направлениях исследований в области стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия, его влияния на климат нашей планеты. Авторы констатируют, что состояние российских исследований в этой сфере не соответствует уровню передовых научных держав. Преодолеть отставание позволит интегрирование национальных исследований в международные программы.

О СТРАТОСФЕРНО-ТРОПОСФЕРНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

П.Н. Варгин, Е.М. Володин, А.Ю. Карпечко, А.И. Погорельцев

Земная атмосфера представляет собой тонкую плёнку толщиной менее 200 км. Без неё наша планета была бы такой же безжизненной, как другие небесные тела окружающего нас космического пространства.

Атмосферу Земли принято делить на следующие области: самая нижняя до высоты примерно 15–18 км в тропиках, а в средних и высоких широтах 10–12 км – тропосфера. Так как плотность атмосферы уменьшается с высотой, то именно в тропосфере сосредоточена основная масса атмосферы – более 80%. Температура в тропосфере уменьшается примерно на 7 градусов на каждый километр, происходящие в ней динамические процессы, например формирование циклонов, определяют погодные условия на поверхности Земли. Большая часть важнейшего естественного парникового газа – водяного пара – находится в тропосфере. Далее до высот 45–50 км расположена стратосфера, в которой температура с высотой увеличивается из-за нагрева при поглощении озоном солнечного излучения. Получаемое при этом тепло является одним из основных источников энергии для циркуляции стратосферы.

Расположенный в стратосфере озоновый слой защищает человека, животный и растительный мир от опасной части ультрафиолетового спектра солнечного излучения. За стратосферой до высоты примерно 80 км расположена мезосфера, в которой температура с высотой понижается. Следующей и последней областью атмосферы является термосфера, в которой температура быстро растёт

с высотой и может достигать 500–2000 К в зависимости от уровня солнечной активности. Граничные области между тропо-, страто-, мезо- и термосферой принято называть соответственно тропопаузой, стратоплаузой и мезоплаузой.

Долгое время считалось, что динамические процессы в тропосфере влияют на формирование погодных условий и климата у поверхности, а роль стратосферы главным образом определяется происходящими в ней радиационными процессами. Однако в 1980–1990-е годы на основе анализа спутниковых наблюдений, теоретических исследований и численного моделирования учёные пришли к выводу о необходимости расширения исследований динамического взаимодействия стратосферы и тропосферы, способного влиять на погодные условия и климат. Это особенно актуально на фоне продолжающегося увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере, которое приводит не только к повышению температуры в тропосфере, но и к её снижению в стратосфере, что, в свою очередь, оказывает влияние на циркуляцию стратосферы, включая меридиональную циркуляцию.

В 1992 г. в рамках Всемирной программы исследования климата ООН был организован международный проект “Стратосферно-тропосферные процессы и их роль в климате” (Stratosphere-Troposphere Processes and their Role in Climates – SPARC, <http://www.sparc-climate.org>). Цель проекта – координация программ изучения специалистами разных стран химических и динамиче-

ВАРГИН Павел Николаевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета. ВОЛОДИН Евгений Михайлович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института вычислительной математики РАН. КАРПЕЧКО Алексей Юрьевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Финского метеорологического института г. Хельсинки. ПОГОРЕЛЬЦЕВ Александр Иванович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой Российского государственного гидрометеорологического университета.
p_vargin@mail.ru; volodin@inm.ras.ru; alexey.karpechko@fmi.fi; apogor@rshu.ru

ских процессов в стратосфере и тропосфере, их взаимосвязи, а также стратосферно-тропосферного обмена, изменения химического состава стратосферы, сравнения и совершенствования реализации динамических и химических процессов стратосферы и тропосферы в климатических моделях. Два раза в год специалистами проекта составляется и бесплатно распространяется в электронном и печатном виде информационный бюллетень о важнейших результатах исследований, прошедших и запланированных конференциях, встречах экспертов и измерительных кампаниях.

Один раз в 4–6 лет проводятся Генеральные ассамблеи СПАРК, последняя из которых (5-я) состоялась в январе 2014 г. в г. Квинстаун, расположенном на Южном острове Новой Зеландии. В работе ассамблеи участвовали около 300 специалистов в области исследования циркуляции и состава средней атмосферы из развитых и развивающихся стран, включая США, Германию, Великобританию, Францию, Италию, Швецию, Финляндию, Японию, Австралию, Новую Зеландию, Россию, Республику Корея, Китай, Индию и Пакистан.

Далее рассказывается о некоторых наиболее актуальных направлениях исследований в области стратосферно-тропосферных взаимодействий и их влиянии на климат, в обсуждении которых на прошедшей ассамблее СПАРК участвовали авторы.

* * *

Из-за особенностей циркуляции внетропической стратосферы её взаимодействие с тропосферой в Северном полушарии ограничено зимним сезоном, продолжающимся обычно с ноября по апрель, когда западный зональный ветер в стратосфере благоприятствует вертикальному распространению планетарных волн из тропосферы в стратосферу. Именно влияние планетарных волн на стратосферную зональную циркуляцию и полярный вихрь, а также изменений его интенсивности на динамические процессы в тропосфере является ключевым элементом взаимодействия тропосферы и стратосферы.

В настоящее время это динамическое взаимодействие активно изучается в ведущих мировых научных центрах США, Великобритании, Германии, Канады, Японии и Китая. Увеличивается число международных научных проектов и публикаций в ведущих научных журналах. Важность исследований в этой области обусловлена необходимостью совершенствования численных моделей, используемых для изучения климата и влияния его изменений на состояние флоры и фауны, хозяйственную деятельность, условия жизни и здоровье населения, а также необходимостью

совершенствования сезонных и многолетних (до 10 лет) прогнозов.

Внезапные стратосферные потепления. Самым ярким примером динамической взаимосвязи тропосферы и стратосферы являются внезапные стратосферные потепления (ВСП), сопровождающиеся быстрым ростом температуры полярной стратосферы (иногда до 70 градусов за несколько дней), наблюдающиеся в Арктике в зимний сезон. Возникновение ВСП связано с распространением планетарных волн из тропосферы в стратосферу и дальнейшим их взаимодействием с зональной циркуляцией. Однако нерегулярные колебания волновой активности, температуры и зонального ветра в верхней стратосфере также могут способствовать возникновению ВСП.

Наиболее сильные ВСП, возникающие в среднем каждую вторую зиму, приводят к изменению направления зонального ветра и повышению температуры в средней стратосфере (на уровне давления 10 гПа или ~32 км) с широтой к северу от 60° с.ш., то есть к формированию аномального меридионального градиента температуры. Именно от возникновения ВСП зависит, насколько активным и изолированным будет стратосферный полярный вихрь в целом за зимний сезон, а это, в свою очередь, определяет, насколько сильным будет разрушение озона в полярной стратосфере.

Как известно, в условиях сильной зональной циркуляции в зимней стратосфере внутри холодного полярного вихря, изолированного от средних широт, могут формироваться полярные стратосферные облака (ПСО), которые участвуют в активации озоноразрушающих соединений и, как следствие, в разрушении озонового слоя. Например, в зимний сезон 2010/11 г. в Арктике ВСП не было, и стратосферный полярный вихрь с низкими температурами и, как следствие, большим количеством образовавшихся ПСО, сохранялся до середины апреля, что привело к рекордному за все годы наблюдений разрушению стратосферного озона. В годы с хорошо выраженными ВСП стратосферный полярный вихрь ослабляется, смещается от полюса или в некоторых случаях разделяется на две части. При этом повышенная температура полярной стратосферы, а иногда и изменившийся своё направление с западного на восточный зональный ветер могут сохраняться до наступления весенней перестройки циркуляции стратосферы, как это было, например, весной 2004 г.

В последние годы связанные с ВСП изменения циркуляции стратосферы распространяются не только на средние широты, но и на тропики, где вызванное ВСП усиление меридиональной циркуляции приводит к снижению температуры нижней стратосферы, что уменьшает её влажность. Установлено, что изменения стратосфер-

ного полярного вихря, в том числе обусловленные ВСП, затрагивают тропосферу, где они могут на протяжении последующих двух месяцев оказывать влияние на погодные условия в средних и высоких широтах Северного полушария. Например, анализ метеорологических данных с 1958 по 2009 г. и расчётов климатических моделей показал, что при ослаблении стратосферного полярного вихря в ряде регионов (в том числе в Восточной Сибири) вероятность резких похолоданий увеличивается на 50% [1]. На основе анализа результатов модельного расчёта за 500 лет для доиндустриального периода (до 1750 г.) установлено, что около 40% резких зимних похолоданий на севере Европы объясняется ослаблением стратосферного полярного вихря [2].

Связанные с ВСП возмущения температурно-го режима распространяются до высот мезосферы и термосферы (на высотах 60–90 км), где состав атмосферы во многом определяется солнечным УФ-излучением, кинетикой химических процессов, а также переносом активных газовых компонентов из нижних слоёв, вызванным различными метеорологическими явлениями, среди которых ВСП являются наиболее значимыми.

Несмотря на пристальное внимание учёных к ВСП с момента их открытия более 60 лет назад, до настоящего времени их прогнозирование ограничивается несколькими сутками. Так, американская система анализа GEOS-5 с верхней границей на 0.01 гПа (~80 км) и разрешением по долготе–широте $0.3^\circ \times 0.25^\circ$ предсказала главное ВСП с разделением полярного вихря в январе 2013 г. за пять суток. Иногда, как в январе 2009 г., главное ВСП может произойти при неблагоприятных внешних факторах, к которым относятся фаза квазидвухлетнего колебания (КДК) зонального ветра на экваторе и фаза 11-летнего солнечного цикла (главные ВСП чаще возникают в годы минимума этого цикла и восточной фазы КДК, а в годы максимума – при западной фазе). Актуальным остаётся возможное изменение частоты и времени возникновения ВСП в условиях ожидаемого в ближайшие десятилетия роста концентраций парниковых газов в атмосфере. Представляет интерес изучение особенностей циркуляции тропосферы, а также аномалий температуры поверхности суши и океана в средних и высоких широтах, которые могут способствовать возникновению ВСП.

Актуальность исследования динамических процессов в стратосфере Арктики получила дополнительное подтверждение весной 2011 г., когда в отсутствие ВСП устойчивый стратосферный полярный вихрь с температурой внутри ниже -80°C наблюдался до середины апреля, что привело к образованию значительной области ПСО, на которой в присутствии солнечного света в марте–

апреле усилилась активизация озоноразрушающих соединений. В результате произошло рекордное за все годы наблюдений разрушение стратосферного озона в Арктике, сравнимое с аналогичным процессом в Антарктиде. Интересно, что прежде чем разрушиться, стратосферный полярный вихрь с образовавшейся озонной аномалией наблюдался над Скандинавией вблизи северо-запада России.

Другой актуальной задачей является исследование межгодовой изменчивости сроков наступления финальных потеплений (весенних перестроек) циркуляции стратосферы, которые происходят в Арктике с конца марта до начала мая. Эти перестройки приводят к изменению направления зонального ветра в стратосфере и разрушению стратосферного полярного вихря, а следовательно, определяют период, когда завершается разрушение озона в полярной стратосфере.

Валидация динамических процессов в стратосфере–тропосфере в современных климатических моделях. Глобальные климатические модели являются основным инструментом исследования наблюдаемых и предполагаемых климатических изменений и их последствий. От качества воспроизведения естественной изменчивости динамических процессов атмосферы зависит воспроизведение параметров как современного климата, так и климата в ближайшие десятилетия. Передовые научные группы, занимающиеся моделированием климата, к числу которых относится Институт вычислительной математики РАН, участвуют в проектах по валидации воспроизведения естественной изменчивости, включая динамические процессы в стратосфере и тропосфере. В настоящее время эта работа осуществляется в рамках международного проекта CMIP5 [3]. Показано, что в моделях, где верхняя граница расчётной области расположена достаточно высоко (выше 1 гПа или 56 км), количество ВСП в среднем примерно равно наблюдаемому, в то время как в моделях с низкой верхней границей количество ВСП в среднем занижено почти в 2 раза. В моделях с высокой верхней границей уменьшение скорости зонального ветра в тропосфере и связанный с этим отрицательный индекс арктического колебания имеет место в течение трёх месяцев после ВСП, что соответствует наблюдениям. В моделях с недостаточно высокой верхней границей такое влияние стратосферы на тропосферу прослеживается лишь в течение месяца после ВСП.

Анализ других параметров, характеризующих динамику стратосферы, также показывает, что модели с достаточным количеством уровней в верхней стратосфере в среднем более правильно воспроизводят динамику стратосферы и её влияние на циркуляцию тропосферы. На основе результатов модельных расчётов до 2100 г., получен-

ных в рамках проекта CMIP5, проанализировано возможное влияние изменений динамики стратосферы, в том числе ослабления стратосферного полярного вихря и усиления меридиональной циркуляции стратосферы, на приземный климат в зимний период [4]. Анализу динамики и химии стратосферы в моделях посвящён также проект CCMVAL, в котором в основном рассматриваются модели динамики и химии атмосферы без интерактивного океана.

Реалистичное воспроизведение стратосферы в моделях циркуляции атмосферы позволяет показывать, например, влияние основной моды изменчивости тропической тропосферы – Эль-Ниньо (Южное колебание, связанное с колебаниями температуры поверхности экваториальной части Тихого океана) – на динамические процессы в тропосфере средних и высоких широт [5].

Стратосферные процессы и совершенствование сезонных прогнозов погоды. Так как релаксационные (подавляющие возмущения) процессы в стратосфере протекают медленно, то возмущения (в первую очередь ВСП), возникнув, сохраняются дольше по сравнению с возмущениями в тропосфере. Таким образом, стратосфера определяет верхние граничные условия для тропосферных процессов, что в некоторых случаях удлиняет предсказуемость погодных условий.

В последние годы на основе анализа данных наблюдений и моделирования показано, что аномалии циркуляции стратосферы, к которым относится изменение силы полярного вихря, вызывают аномалии циркуляции тропосферы, которые достигают приземных уровней примерно за неделю и могут сохраняться там до двух месяцев. Аномалии в тропосфере, как правило, характеризуются меридиональным смещением струйных течений и связанных с ними шторм-треков. За счёт сильно зональной формы такие аномалии называют круговой модой циркуляции внетропических широт Северного полушария или арктической осцилляцией. Её положительная фаза соответствует сильному полярному вихрю в стратосфере и более низкому давлению в полярном регионе по сравнению со средними широтами, а отрицательная фаза – ослабленному (часто в ходе ВСП) стратосферному полярному вихрю и более высокому давлению в тропосфере полярного региона. В последнем случае из-за смещения к экватору и ослабления шторм-треков холодные воздушные массы с сильными осадками проникают дальше на юг Северной Америки и Европы.

Использование процедуры “наджинга” (когда рассчитываемые при моделировании параметры динамики подтягиваются к данным наблюдений) для стратосферы внетропических широт в зимний период позволило добиться улучшения воспроизведения основных мод приземного климата

(арктической осцилляции и северо-атлантического колебания), а также температуры на поверхности и осадков в ряде регионов, особенно в Европе [6]. В настоящее время ряд прогностических центров в мире уже использует в своих прогностических системах подробное описание стратосферы.

Аэрозоли и их влияние на климат. В результате мощных извержений вулканов, выбросы которых распространяются до стратосферы, количество аэрозольных частиц в ней увеличивается и сохраняется до двух лет, в отличие от тропосферы, где эти частицы быстро удаляются с осадками. Как следствие – уменьшается проникновение солнечного излучения к поверхности Земли и снижается её температура. Именно этот механизм был предложен как один из возможных геоинженерных методов снижения скорости роста приземной температуры вследствие увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере. Первым подобный способ воздействия на климат предложил академик М.И. Будыко в начале 1970-х годов. Среди многочисленных сомнений относительно применения такого подхода – возможное негативное влияние увеличения количества аэрозолей на стратосферный озон, а также изменение режима осадков в ряде регионов.

Хотя применение этого геоинженерного метода в настоящее время технически нереализуемо, изучение взаимосвязи содержания аэрозольных частиц и параметров приземного климата на циркуляцию стратосферы представляет научный интерес и осуществляется с использованием климатических моделей во многих странах, в том числе и в России.

Тренды температуры стратосферы. Увеличение концентрации парниковых газов приводит к снижению температуры стратосферы. Анализ ракетных, спутниковых и баллонных измерений показывает, что это снижение составляет до 2 градусов за 10 лет в верхней стратосфере и нижней мезосфере. Другим важным процессом, влияющим на температуру стратосферы, является восстановление стратосферного озона, происходящее в результате сокращения выбросов в атмосферу озоноразрушающих веществ. Анализ трендов температуры стратосферы осложнён двумя мощными извержениями вулканов, произошедшими за период спутниковых наблюдений, – Эль Чичон в Мексике в 1982 г. и Пинатубо на Филиппинах в 1991 г. Эти извержения привели к кратковременным (около двух лет) потеплениям тропической стратосферы на 2–3 градуса за счёт поглощения солнечной радиации вулканическим аэрозолем.

Ряд полученных в последние годы результатов моделирования свидетельствует, что вследствие изменения климата в ближайшие десятилетия может усилиться меридиональная циркуляция

атмосферы (циркуляция Брюера–Добсона), что будет способствовать уменьшению “среднего возраста” малых газовых составляющих атмосферы. Например, озон будет быстрее переноситься из тропического региона, где происходит его основное образование, в средние и высокие широты.

Состав стратосферы и стратосферно-тропосферный обмен. Недавно в США получены результаты анализа данных наблюдений и моделирования, показавшие, что уменьшение содержания важнейшего парникового газа — водяного пара — в нижней стратосфере на 10% начиная с 2000 г. могло компенсировать на ~25% увеличение приземной температуры [7]. Высказано предположение, что наблюдавшийся в 1980–2000 гг. рост влажности в нижней стратосфере примерно на 1% в год, наоборот, мог привести к усилению роста приземной температуры. Причины изменений содержания водяного пара в стратосфере остаются неизвестными.

Установлено, что перенос водяного пара в нижнюю стратосферу из тропосферы в тропиках в зимние сезоны с ВСП в Арктике слабее, чем в зимние сезоны без них. ВСП вызывают выхолаживание тропической стратосферы из-за изменения меридиональной циркуляции и одновременно влияют на тропосферу тропиков, усиливая там конвекцию и режим облачности. В этой связи исследование изменений содержания водяного пара в стратосфере, влияния этих изменений на химические процессы и радиационный баланс атмосферы, а также особенностей переноса водяного пара из тропосферы в стратосферу в настоящее время является одной из важнейших научных задач. К числу других важных задач по-прежнему относится изучение динамики стратосферного озона, которая тесно связана с изменением как температуры стратосферы, так и содержания в стратосфере водяного пара, метана, окислов азота, брома, озоноразрушающих соединений, а также анализ динамических процессов, определяющих метеорологические условия полярной стратосферы и ответственных за возникновение ВСП, и возможного в ближайшие десятилетия усиления меридиональной циркуляции.

Изменение динамики стратосферы и климат Южного полушария. За последние 10 лет получены результаты, свидетельствующие о влиянии разрушения стратосферного озона над Антарктикой на циркуляцию тропосферы и параметры приземного климата. Из-за значительного уменьшения озонового слоя на высотах 12–25 км в Антарктике в сентябре–октябре (которое обычно сильнее, чем в Арктике, за счёт более устойчивого и сильного полярного вихря) температура нижней стратосферы может снижаться на ~10 градусов, что приводит к усилению и смещению в направ-

лении к полюсу струй зонального ветра в тропосфере. Эти процессы влияют на приземный климат не только средних и высоких широт Южного полушария, но и субтропиков, в частности, на режим осадков.

Отметим, что, согласно модельным расчётам, смещению к полюсу струй зонального ветра в тропосфере может способствовать увеличение концентрации парниковых газов в атмосфере. Безусловно, актуальной задачей является изучение этих двух процессов, учитывая предполагаемое в ближайшие десятилетия восстановление озонового слоя и продолжающийся рост концентрации парниковых газов.

* * *

Остановимся кратко на некоторых исследованиях стратосферно-тропосферных взаимодействий, а также на новых методах наблюдений за динамическими процессами и составом стратосферы.

В последние два года расширяется сеть лидарных наблюдений Росгидромета. К настоящему времени лидары, способные измерять параметры атмосферы до высот ~70 км, установлены в городах Обнинске (Калужская область), Санкт-Петербурге, Долгопрудном (Московская область), Ардоне (Северная Осетия–Алания). На основе лидарных наблюдений специалисты НПО “Тайфун” проанализировали распространение гравитационных волн в стратосфере и мезосфере, определили параметры полярных стратосферных облаков в стратосферном вихре, когда он в декабре 2012 г. располагался над европейской территорией России [8]. Кроме того, с использованием лидарных наблюдений и траекторного моделирования проанализированы траектории движения Челябинского метеорита и его аэрозольного следа в феврале 2013 г. В Центральной аэрологической обсерватории (ЦАО) проанализированы лидарные наблюдения распространения над территорией России вулканической пыли при извержении вулкана в Исландии в апреле 2010 г. [9].

После перерыва почти в 15 лет в ЦАО восстанавливается метеорологическое ракетное зондирование средней и верхней атмосферы, разрабатываются новые измерительные приборы для ракетных наблюдений. Хотя такие наблюдения достаточно дорогостоящие, ряд научных задач по исследованию атмосферных процессов может быть решён только на их основе, использование спутниковых или наземных наблюдений не позволяет получить необходимую информацию. Ракетные измерения осуществляются в Европейском союзе и США, а в последние пять лет также в Китае и Бразилии.

Стратосферный полярный вихрь в конце зимнего сезона чаще всего располагается над терри-

торией России, поэтому важное значение имеет мониторинг и анализ вертикального распределения озона с помощью баллонных измерений, осуществляемых в том числе в рамках международного проекта “Match”, а также развитие сети наземных измерений с использованием французских приборов SAOZ, определяющих общее содержание озона и двуокси азота [10]. К настоящему времени такие регулярные измерения проводятся по инициативе ЦАО на озонметрических станциях Росгидромета в Долгопрудном, Мурманске, Жиганске, Салехарде, Анадыре и Иркутске.

Используя возможности уникального российского самолёта-лаборатории М-55 “Геофизика”, способного подниматься на высоту до 20 км и оснащённого российскими и зарубежными измерительными приборами, за последние 15 лет с участием специалистов ЦАО проведено 12 международных кампаний в различных регионах Земли, в ходе которых изучались динамические и химические процессы и состояние озонового слоя в стратосфере Арктики и Антарктики, процессы конвекции и стратосферно-тропосферного обмена в тропиках. Данные наблюдений анализируются в том числе с использованием химико-транспортных моделей. Очередная кампания в рамках европейского проекта “Stratoclim” запланирована на лето 2016 г. и будет посвящена изучению особенностей стратосферно-тропосферного обмена и влияния стратосферных процессов на климат в зоне действия индийского муссона.

В области изучения возможности внесения аэрозольных частиц в стратосферу с целью снижения темпов увеличения температуры у поверхности в России с участием специалистов Института глобального климата и экологии РАН и Росгидромета с использованием климатической модели Института вычислительной математики (ИВМ) РАН и климатической модели Института физики атмосферы РАН проведены исследования возможного влияния на климат этого геоинженерного метода [11, 12, 13, 14].

Специалистами ЦАО более 10 лет назад был разработан оптический высокоточный гигрометр с хорошим быстродействием “Flash”, способный измерять концентрацию водяного пара в стратосфере с высоким разрешением. Российский прибор оказался весьма востребованным и успешно зарекомендовал себя по сравнению с американским и немецким гигрометрами в международных экспериментах по исследованию стратосферы. С его помощью в ходе масштабных измерительных кампаний в Арктике, Антарктике, Австралии, Бразилии, Африке и Европе удалось провести ряд уникальных наблюдений, в результате которых в тропиках обнаружили так называемые ледяные гейзеры, а в Арктике впервые зафиксировали момент формирования ледяного стратосферного

облака. Такие облака играют ключевую роль в весеннем разрушении озона в полярной стратосфере [15, 16].

Кроме того, ЦАО на основе анализа данных наблюдений выявлено влияние волновых цепочек в тропосфере на усиление распространения волновой активности из тропосферы в стратосферу и разделение стратосферного полярного вихря в Арктике и Антарктике в период ВСП [17, 18]. Проведённые модельные расчёты для ВСП в Антарктике в сентябре 2002 г. подтвердили возможность такого механизма.

В Российском государственном гидрометеорологическом университете (Санкт-Петербург) на основе анализа данных реанализа и численного моделирования проведены исследования изменчивости динамических процессов в стратосфере и тропосфере, в том числе изучена климатическая изменчивость сроков весенней перестройки циркуляции стратосферы [19], рассмотрено влияние собственных колебаний атмосферы на частоту возникновения и интенсивность ВСП [20]. Показано, что в последние десятилетия наблюдается существенный рост амплитуды стационарной планетарной волны с зональным волновым числом $m = 1$ в стратосфере, что приводит к усилению нелинейного взаимодействия этой волны со средним потоком и, как следствие, возрастает магнитуда нерегулярных колебаний волновой активности и среднего потока так называемых стратосферных вадцилляций [21]. Сделан вывод, что динамические процессы в стратосфере становятся всё более нерегулярными, и это должно приводить к более частому, а возможно, и более интенсивному развитию аномалий температуры и региональных циркуляционных ячеек в тропосфере.

Специалисты Сибирского регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института Росгидромета (Новосибирск) и Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Томск), проведя исследование влияния величины осеннего снежного покрова на приземную температуру в Сибири в зимний период и используя данные расчётов климатической модели промежуточной сложности “Planet Simulator”, показали, что наибольшее влияние аномалий величины осеннего снежного покрова проявляется последующей зимой в декабре. Установлено, что данное влияние в значительной степени обусловлено тесным взаимодействием тропосферы и стратосферы [22]. Ранее были проведены модельные исследования роли изменения силы полярного вихря в циркуляции нижней тропосферы [23].

В ИВМ РАН на основе исследования механизмов формирования квазидвухлетних колебаний экваториального ветра в стратосфере создана новая версия климатической модели высокого про-

странственного разрешения, воспроизводящая КДК с характеристиками, близкими к наблюдаемым [24]. Изучены проблемы структурной устойчивости и синхронизации КДК с различными периодическими процессами (годовой ход Солнца, полугодовые колебания экваториального ветра и др.), показана определяющая роль планетарных волн в формировании основного периода цикла и важная роль коротких волн в передаче энергии и синхронизации КДК и полугодового мезосферного цикла [25].

В Гидрометцентре России на основе исследований динамических факторов, влияющих на распространение из тропосферы в стратосферу планетарных волн, показано, что характер циркуляции тропосферы над Таймыром в октябре может являться предвестником преобладающей зимней фазы арктической осцилляции [26].

В Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) проведены исследования нелинейных температурных изменений в области мезопаузы на фоне глобальных изменений климата с использованием по спектрометрическим измерениям гидроксильного излучения. Измерения проводились на станции ИФА в Звенигороде (Московская область), которая входит в международную Сеть по обнаружению изменений состава атмосферы (NDACC). В частности, показано, что общее снижение температуры мезопаузы над Звенигородом зимой (когда наблюдаются наиболее сильные межгодовые изменения) с 1960 по 2012 г. составило 35 градусов, причём если с 1960 по 1987 г. линейный тренд оценён в -9.9 градуса за 10 лет, то с 1987 по 2012 г. он в 4 раза меньше, то есть -2.4 градуса за 10 лет [27].

Кроме того, в ИФА РАН с использованием оригинальной методики выполняются многолетние регулярные спектрометрические измерения содержания двуокси азота (NO_2) в стратосфере и тропосфере. Всесторонне исследована изменчивость содержания NO_2 в стратосфере и пограничном слое атмосферы [28], получены оценки многолетних трендов стратосферного содержания NO_2 [29], отмечена значительная отрицательная аномалия стратосферного содержания NO_2 весной 2011 г. над Москвой, вызванная переносом стратосферного воздуха из области арктической озонной “дыры” [30].

С использованием глобальной самосогласованной модели термосферы, ионосферы и протосферы в Западном отделении Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (Калининград) ведутся исследования отклика термосферы и ионосферы на ВСП. Согласно результатам расчётов и данным наблюдений, во время ВСП отмечается антикорреляция возмущений температуры в мезосфере и нижней термосфере. Впервые пока-

зано, что направленный на запад циркумполярный вихрь на высотах нижней термосферы разрушается во время ВСП и образуется более сложная циркуляционная система. Установлено, что отрицательные глобальные возмущения электронной плотности в ионосфере, наблюдавшиеся со спутников во время ВСП в январе 2008 г., связаны с изменениями температуры и плотности в мезосфере – нижней термосфере. Нагрев термосферы, который происходит во время ВСП, приводит к уменьшению отношения концентраций атомарного кислорода и молекулярного азота ($n(\text{O})/n(\text{N}_2)$) и, соответственно, уменьшению электронной плотности на высотах F области ионосферы в средних широтах [31].

В последние годы на русском языке опубликован ряд учебных пособий и книг, посвящённых изучению циркуляции средней атмосферы. В 2014 г. издано учебное пособие “Общая циркуляция атмосферы” Ю.П. Переведенцева, И.И. Мохова, А.В. Елисеева. В издательстве “Физматлит” в 2011 г. на русском языке вышла книга “Взаимодействие стратосферы и тропосферы”, автор которой – индийский профессор К. Моханакумар, в ней освещены наиболее важные аспекты исследований взаимодействия тропосферы и стратосферы. Подготовлен сборник статей по результатам международной школы-конференции молодых учёных “Enviromis” в Петрозаводске в сентябре 2014 г. по моделированию климата с использованием на удалённом доступе климатической модели ИВМ РАН.

Несмотря на ряд достижений, современное состояние российских исследований стратосферно-тропосферных взаимодействий не может быть охарактеризовано как соответствующее уровню передовых научных держав, в первую очередь США, Великобритании, Германии, Канады, Японии. Интегрирование национальных исследований в международные программы, осуществляемые в рамках СПАРКа, могло бы способствовать развитию этих исследований в России. Для их поддержки на конкурсной основе целесообразно более активно использовать возможность реферирования проектов зарубежными экспертами.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 13-05-01007 и № 12-05-0056-а) и РНФ (грант № 14-17-00685).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kolstad E., Breiteig T., Scaife A. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2010. V. 136. P. 886–893.
2. Tomassini L., et al. The role of stratosphere-troposphere coupling in the occurrence of extreme winter cold spells over northern Europe // J. Advances in modeling Earth systems. 2012. V. 4. M00A03.

3. *Charlton-Perez A., et al.* On the lack of stratospheric dynamical variability in lowtop versions of the CMIP5 models // *J. Geophys. Res.* 2013. V. 118. P. 2494–2505.
4. *Manzini E., et al.* Northern winter climate change: Assessment of uncertainty in CMIP5 projections related to stratosphere-troposphere coupling // *J. Geophys. Res.* 2014. V.119. № 13.
5. *Bell C., et al.* Stratospheric Communication of El Niño Teleconnections to European Winter // *J. Climate.* 2009. V. 22. P. 4083–4096.
6. *Douville H.* Stratospheric polar vortex influence on Northern Hemisphere winter climate variability // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L18703
7. *Solomon S., et al.* Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming // *Science Express.* 2010. V. 327. P. 1219–1223.
8. *Коршунов В.А., Зубачёв Д.С.* Наблюдение полярных стратосферных облаков над г. Обнинск в декабре 2012 г. // *Метеорология и гидрология.* 2014. № 4.
9. *Ганьшин А.В., Лукьянов А.Н., Хаттатов В.У. и др.* Присутствие вулканического пепла над территорией Российской Федерации вследствие извержения вулкана в Исландии 14 апреля 2010 г. по данным модельных расчётов и наблюдений // *Метеорология и гидрология.* 2012. № 9.
10. *Дорохов В.М., Ивлев Г.А., Привалов В.И., Шаламянский А.М.* Техническое оснащение наземной сети станций измерения общего содержания озона в России и перспективы модернизации // *Оптика атмосферы и океана.* 2014. № 3.
11. *Володин Е.М., Кострыкин С.В., Рябошапка А.Г.* Моделирование изменения климата вследствие введения серосодержащих веществ в стратосферу // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2011. № 4.
12. *Izrael Yu.A., Volodin E.M., Kostrykin S.V., et al.* The ability of stratospheric climate engineering in stabilizing global mean temperatures and an assessment of possible side effects // *Atmos. Sci. Lett.* 2014. № 2.
13. *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. № 6.
14. *Елисеев А.В., Мохов И.И.* Модельные оценки эффективности ослабления и предотвращения глобального потепления климата в зависимости от сценариев контролируемых аэрозольных эмиссий в стратосферу // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2009. № 2.
15. *Khaykin S., Pommereau J.-P., Korshunov L., et al.* Hydration of the lower stratosphere by ice crystal geysers over land convective systems // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9. P. 2275–2287.
16. *Khaykin S., Engel M., Vömel I., et al.* Arctic stratospheric dehydration – Part 1: Unprecedented observation of vertical redistribution of water // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13. P. 11503–11517.
17. *Peters D., Vargin P., Gabriel A. et al.* Tropospheric forcing of the boreal polar vortex splitting in January 2003 // *Annales Geophys.* 2010. V. 28. P. 1–16.
18. *Vargin P.* Stratospheric polar vortex splitting in December 2009 // *Atmosphere–Ocean.* 2013. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07055900.2013.851066#.U-tmxoxzbIU>
19. *Savenkova E.N., Kanukhina A.Yu., Pogoreltsev A.I., Merzlyakov E.G.* Variability of the springtime transition date and planetary waves in the stratosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. V. 90–91. P. 1–8.
20. *Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н.* Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // *Геомagnetизм и аэрoнoмия.* 2014. № 3.
21. *Pogoreltsev A.I., et al.* Variability of Planetary Waves as a Signature of Possible Climatic Changes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009. V. 71. P. 1529–1539.
22. *Мартынова Ю.В., Крупчатников В.Н.* Исследование чувствительности приземной температуры в Евразии в зимний период к аномалиям снежного покрова. Роль стратосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. № 6.
23. *Боровко И.В., Крупчатников В.Н.* Влияние динамики стратосферного полярного вихря на циркуляцию в нижней тропосфере // *Сибирский журнал вычислительной математики РАН.* 2009. № 2.
24. *Кулямин Д.В., Володин Е.М., Дымников В.П.* Моделирование квазидвухлетних колебаний зонального ветра в экваториальной стратосфере. Часть II. Модели общей циркуляции атмосферы // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2009. № 1.
25. *Кулямин Д.В., Дымников В.П.* Спектральные характеристики квазидвухлетних колебаний экваториального стратосферного ветра и проблема синхронизации // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана.* 2010. № 4.
26. *Крыжов V.N.* October circulation precursors of the wintertime Arctic Oscillation // *Inter. J. Climatology.* 2014. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.3968/abstract>
27. *Мохов И.И., Семёнов А.И.* Нелинейные температурные изменения в атмосфере в области мезопаузы на фоне глобальных изменений климата в 1960–2012 гг. // *Доклады АН.* 2014. № 5.
28. *Gruzdev A.N., Elokhov A.S.* Variability of stratospheric and tropospheric nitrogen dioxide observed by visible spectrophotometer at Zvenigorod, Russia // *Int. J. Remote Sensing.* 2011. № 11.
29. *Gruzdev A.N.* Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂ // *Int. J. Remote Sensing.* 2009. № 15.
30. *Груздев А.Н., Елохов А.С.* Отрицательная аномалия стратосферного содержания NO₂ над Звенигородом в конце марта – начале апреля 2011 г. // *Доклады АН.* 2012. № 3.
31. *Korenkov Y.N., Klimenko V.V., Klimenko M.V., et al.* The global thermospheric and ionospheric response to the 2008 minor sudden stratospheric warming event // *J. Geophys. Res.* 2012. V. 117. A10309.