

УДК 551.513.11

ТРЕНДЫ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОТОКА ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

© 2024 г. К. А. Диденко^{1,2,*}, Т. С. Ермакова^{2,3,**}, А. В. Коваль^{2,***}, Е. Н. Савенкова^{3,****}

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), Санкт-Петербург, Россия

³Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: didenko@izmiran.ru

**e-mail: taalika@mail.ru

***e-mail: a.v.koval@spbu.ru

****e-mail: savenkova.en@mail.ru

Поступила в редакцию 30.12.2023 г.

После доработки 04.04.2024 г.

Принята к публикации 23.04.2024 г.

По данным глобального реанализа атмосферы JRA-55 изучаются долговременные тренды трехмерного потока волновой активности Пламба. Вертикальная компонента потока Пламба характеризует распространение атмосферных планетарных волн, генерируемых в тропосфере, в верхние слои атмосферы и используется для анализа стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия. Исследование потока волновой активности проводилось для трех широтных секторов Северного полушария для месяцев с декабря по март, за 64-летний период с 1958 г. Показано, что в январе и марте над Дальним Востоком России наблюдается статистически значимый тренд на увеличение потока волновой активности из тропосферы в стратосферу, что может способствовать возрастанию частоты формирования волн холода в тропосфере средних широт. Исследование стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия в целом и потоков волновой активности в частности необходимо для решения задач, связанных как с глобальными и региональными климатическими изменениями, так и с перемешиванием долгоживущих атмосферных компонент.

DOI: 10.31857/S0016794024060099, EDN: QOGNOR

1. ВВЕДЕНИЕ

Динамика тропосферы и стратосферы принципиально неразделима, а их динамическое взаимодействие наблюдается в зимний сезон. При этом механизмы, определяющие генерацию и поддержание циркуляции, в этих атмосферных слоях различаются так же, как и протяженность и сила влияния одного атмосферного слоя на другой [Baldwin and Dunkerton, 2001; Chan and Plumb, 2009; Baldwin et al., 2019]. В отличие от тропосферной циркуляции, сложность которой обусловлена большим количеством процессов разных масштабов, связанных с взаимодействием атмосферы с поверхностью Земли, стратосфера в известной степени геострофична, а ее динамика определяется главным образом взаимодействием среднего потока с волновыми и вихревыми структурами [Haynes et al., 1991; Haigh et al.,

2005; Haigh and Blackburn, 2006]. Генерируемые орографией и разницей нагрева океанов и материков, планетарные волны распространяются от своих источников в тропосфере, переносят энергию и импульс, вызывая вариации стратосферной циркуляции. Эти вариации, особенно вариации интенсивности стратосферного полярного вихря, вызывают отклик в тропосфере и включают механизм обратной связи, посредством которого стратосфера оказывает влияние на тропосферу [Charney and Drazin, 1961; Chen and Robinson, 1992; Reichler et al., 2005].

Исследования тропосферно-стратосферных связей уже давно занимают центральное место в работах по атмосферной динамике и посвящены анализу как динамического, так и радиационного взаимодействия [Baldwin et al., 2019; Solomon et al., 2010]. Это обусловлено тем, что межгодовые

изменения этих связей являются не только индикаторами изменений озонового слоя и климата, но и могут быть использованы в качестве предикторов экстремальных погодных явлений в зимнее время [Robock, 2001; Jadin et al., 2010; Смышляев и др., 2016]. Например, усиленный вертикальный поток волновой активности, приводящий к блокирующему режиму взаимодействия стратосфера–тропосфера, благоприятен для возникновения внезапных стратосферных потеплений (ВСП). Их развитие определяет вариации температурного режима обычно слабоизменчивой стратосферы, а также влияют на температурный режим тропосферы и циклогенез [Polvani and Waugh, 2004; Scott and Polvani, 2006; Погорельцев и др., 2014; Варгин и др., 2015; Гечайте и др., 2016]. В настоящее время прогнозирование ВСП, как явления, наиболее ярко влияющего на динамику стратосферы, лучшими прогностическими численными моделями в среднем ограничено ~10 сут [Karpechko et al., 2018]. Поэтому исследования динамики стратосферы в целом и влияния на нее динамики тропосферы в частности в последние годы остаются актуальными и связаны с возможностью совершенствования сезонных прогнозов, путем улучшения воспроизведения динамики стратосферы в моделях.

В работе [Rakushina et al., 2018] с использованием данных реанализов был проведен анализ климатической изменчивости амплитуд стационарных планетарных волн с разными зональными волновыми числами от уровня тропосферы до нижней мезосферы. Различные наборы данных показали статистически значимую внутрисезонную изменчивость амплитуд стационарных планетарных волн с зональным волновым числом $m=2$ (СПВ2), которая увеличивается в последние десятилетия в стратосфере средних широт. Анализ изменений стационарных планетарных волн с зональным волновым числом $m=1$ (СПВ1) продемонстрировал существенный рост амплитуд в декабре и их ослабление в январе–феврале в стратосфере высоких и средних широт. Роль взаимодействия атмосферных волн с зональными волновыми числами 1 и 2 в динамическом взаимодействии стратосферы и тропосферы, а также его внутрисезонные особенности были исследованы в работе [Wei et al., 2021]. В частности показано, что наблюдаются различия в распространении волновой активности и в межволновом взаимодействии в первой и второй половине зимнего сезона.

Анализ изменчивости амплитуд планетарных волн и их влияния на динамический и температурный режимы также проводился по результатам

численного моделирования глобальной атмосферной циркуляции [Liu et al., 2004; Koval et al., 2022a; 2023]. Результаты показали, что учет планетарных волн с различными периодами при проведении численных экспериментов приводит к существенным изменениям скорости среднезонального ветра, компонент меридиональной циркуляции и, как следствие, фоновой температуры. Вариации стратосферно-тропосферного взаимодействия являются следствием наблюдаемых и моделируемых изменчивостей амплитуд планетарных волн [Thompson et al., 2006; Pogoreltsev et al., 2009; Koval et al., 2022b].

Целью данной работы является исследование межгодовой изменчивости стратосферно-тропосферного динамического взаимодействия. Для этого было проанализировано распространение планетарных волн в атмосфере с использованием трехмерных потоков волновой активности, рассчитанных с применением подхода Пламба, которые являются индикатором и важным фактором вышеупомянутого взаимодействия, на основе данных реанализа JRA-55 [Kobayashi et al., 2015]. Вертикальная составляющая потока волновой активности была усреднена по трем широтно-долготным секторам Северного полушария для месяцев с декабря по март, построены временные ряды и оценена значимость обнаруженных трендов.

2. МЕТОДОЛОГИЯ

Потоки волновой активности с применением подхода, предложенного Р.А. Пламбом, обычно рассматриваются при анализе дивергенции потока в горизонтальной плоскости-распространения планетарных волн в атмосфере и их воздействия на зональную циркуляцию [Andrews and McIntyre, 1976; Plumb, 1985]. Этот подход подразумевает расчет направления распространения волнового пакета в трехмерной системе координат, что успешно применяется в изучении вертикального распространения волн из стратосферы и тропосферу [Zyulyaeva and Zhadin, 2009; Гечайте и др., 2016] и их отражения в обратном направлении [см., например, Vargin et al., 2022]. Трехмерный поток волновой активности Пламба по сравнению с двумерным потоком Элиассена–Пальма позволяет анализировать региональное динамическое взаимодействие стратосферы и тропосферы, а также региональные особенности распространения волновой активности [Wei et al., 2021; Geçaitė, 2021]. Трехмерный вектор потока волновой активности описывает распространение планетарных волн вдоль долготы (F_x), широты (F_y), высоты (F_z):

$$\mathbf{F}_s = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \frac{P}{P_0} \cos \varphi \begin{pmatrix} v'^2 - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(v'\phi')}{\partial \lambda} \\ -u'v' + \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(u'\phi')}{\partial \lambda} \\ \frac{2\Omega \sin \varphi}{S} \left[v'T' - \frac{1}{2\Omega a \sin 2\varphi} \frac{\partial(T'\phi')}{\partial \lambda} \right] \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где P — давление; P_0 — давление, равное 1000 гПа; Ω — угловая скорость вращения Земли; λ — долгота; φ — широта; a — радиус Земли; S — параметр статической устойчивости; u' — возмущение зональной скорости (отклонение от усредненного по долготе значения); v' — возмущение меридиональной скорости; T' — возмущение температуры; ϕ' — возмущение геопотенциала. Параметр статической устойчивости определяется следующим образом:

$$S = \frac{\partial \hat{T}}{\partial z} + \frac{k\hat{T}}{H}, \quad (2)$$

где $\hat{T}$ — температура, усредненная по территории к северу от 20°N ; k — коэффициент теплопроводности; H — масштаб высоты.

3. ДАННЫЕ И ПОТОКИ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

Данные температуры воздуха, скорости зонального и меридионального ветра, давления и геопотенциальной высоты взяты из базы данных JRA-55 и усреднены за каждый месяц с 1958 по 2021 гг. Эти данные использовались для расчета потоков волновой активности Пламба, характеризующих распространение планетарных волн и стратосферно-тропосферное динамическое взаимодействие. Усредненные значения вертикальной составляющей потока за все годы наблюдений для декабря, января, февраля и марта в Северном полушарии на 20 км представлены на рис. 1.

Результаты показывают зону распространения восходящего потока волновой активности над Дальним Востоком России и отсутствие заметной зоны распространения нисходящего потока. В первые зимние месяцы наблюдаются наибольшие значения вертикальной составляющей пото-

ков волновой активности Пламба из тропосферы в стратосферу — рис. 1а и 1б.

Для примера, на рис. 2 показаны усредненные за 10 лет (2008–2017 гг.) значения вертикальной компоненты потока волновой активности для месяцев с декабря по март. Нисходящие потоки волновой активности из стратосферы в тропосферу наблюдаются над Гренландией и севером Канады, но значения практически на порядок меньше в сравнении со значениями восходящих потоков.

Полученное усреднение позволило определить области разделения территории Северного полушария на широтно-долготные сектора для дальнейшего исследования межгодовой изменчивости вертикальной составляющей потока, построения и оценки линейного тренда. Выбранные сектора представлены на рис. 1а. К первому сектору (I) относится большая часть Европы, север Африки, европейская часть России и Ближний Восток, ко второму (II) — азиатская часть России и страны Азии (где наблюдается максимум восходящего потока волновой активности), к третьему (III) — Канада, Гренландия, США и Северная Атлантика (где наблюдается максимум нисходящего потока волновой активности).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью исследования межгодовой изменчивости стратосферно-тропосферного взаимодействия, среднемесячные значения вертикальной составляющей потока волновой активности были усреднены в каждом секторе в областях ее наблюдаемых вариаций, т.е. в полосе 37.5° – 77.5°N . Усреднения проводились для уровня 20 км (50 гПа), и результаты получены отдельно для каждого месяца с декабря по март за период с 1958 по 2021 гг. Расчеты были также выполнены для более высоких уровней, и полученные тенденции при этом сохраняются. Для временных зависимостей построены линейные тренды и определялась их статистическая значимость. Значения уровней значимости для всех секторов и месяцев за период с 1958 по 2021 гг. представлены в табл. 1.

На рис. 3 представлены временные изменчивости вертикальной составляющей потока волновой активности в каждом секторе для декабря. Ожидалось, что наиболее интересные результаты будут во II секторе, где наблюдаются максимальные значения восходящего потока волновой активности, и особое внимание нужно уделить III сектору, где в некоторые годы наблюдаются отрицательные значения вертикальной компоненты потока Пламба. Значения потока волновой активности во II секторе в 2 раза больше значений

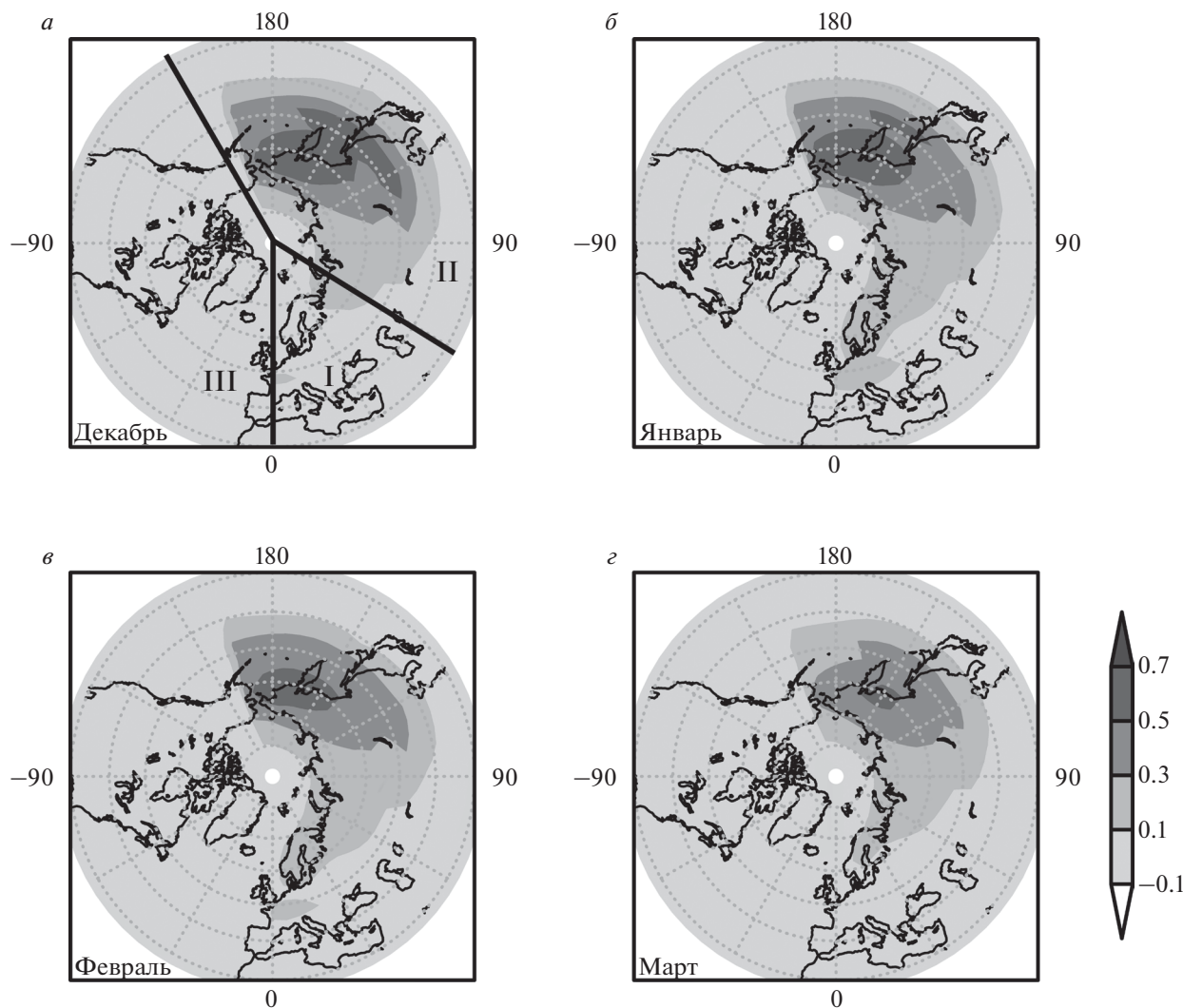


Рис. 1. Вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности ($\text{м}^2/\text{с}^2$), усредненная за 64 года (1958–2021 гг.): (а) – декабрь, (б) – январь, (в) – февраль, (г) – март, высота 20 км. Данные JRA-55.

в III секторе и в 3–4 раза больше значений в I секторе, что характерно для всех рассматриваемых месяцев.

Из рис. 3в видно, что в III секторе в декабре наблюдается незначительное увеличение волновой активности за период с 1958 по 2021 гг., но статистическая значимость полученных результатов низкая. Статистически значимых трендов в остальных секторах не наблюдается. Однако было решено отдельно рассмотреть межгодовую изменчивость вертикальной составляющей потока, усредненную по тем же параметрам за период с 1980 по 2021 гг. (рис. 4), так как с 1980 г. данные реанализов, в том числе используемого в этой работе, были значительно улучшены посредством использования при ассимиляции спутниковых данных [Gelaro et al., 2017]. Значения уровней

значимости для всех секторов и месяцев за этот период представлены в табл. 2.

Результаты расчета и усреднения по секторам вертикальной составляющей потока волновой активности с 1980 г. для декабря на рис. 4 показывают, что во II секторе также не наблюдается статистически значимого тренда, но и в III секторе линейный тренд не значим. Значимым становится тренд в I секторе (уровень значимости 10%), в котором наблюдается уменьшение потока волновой активности из тропосферы в стратосферу. Стоит отметить, что в декабре в III секторе наблюдается один из максимумов (для этого сектора) усредненного восходящего потока волновой активности в 2017 г., хотя в этой области нисходящие потоки наблюдаются чаще.

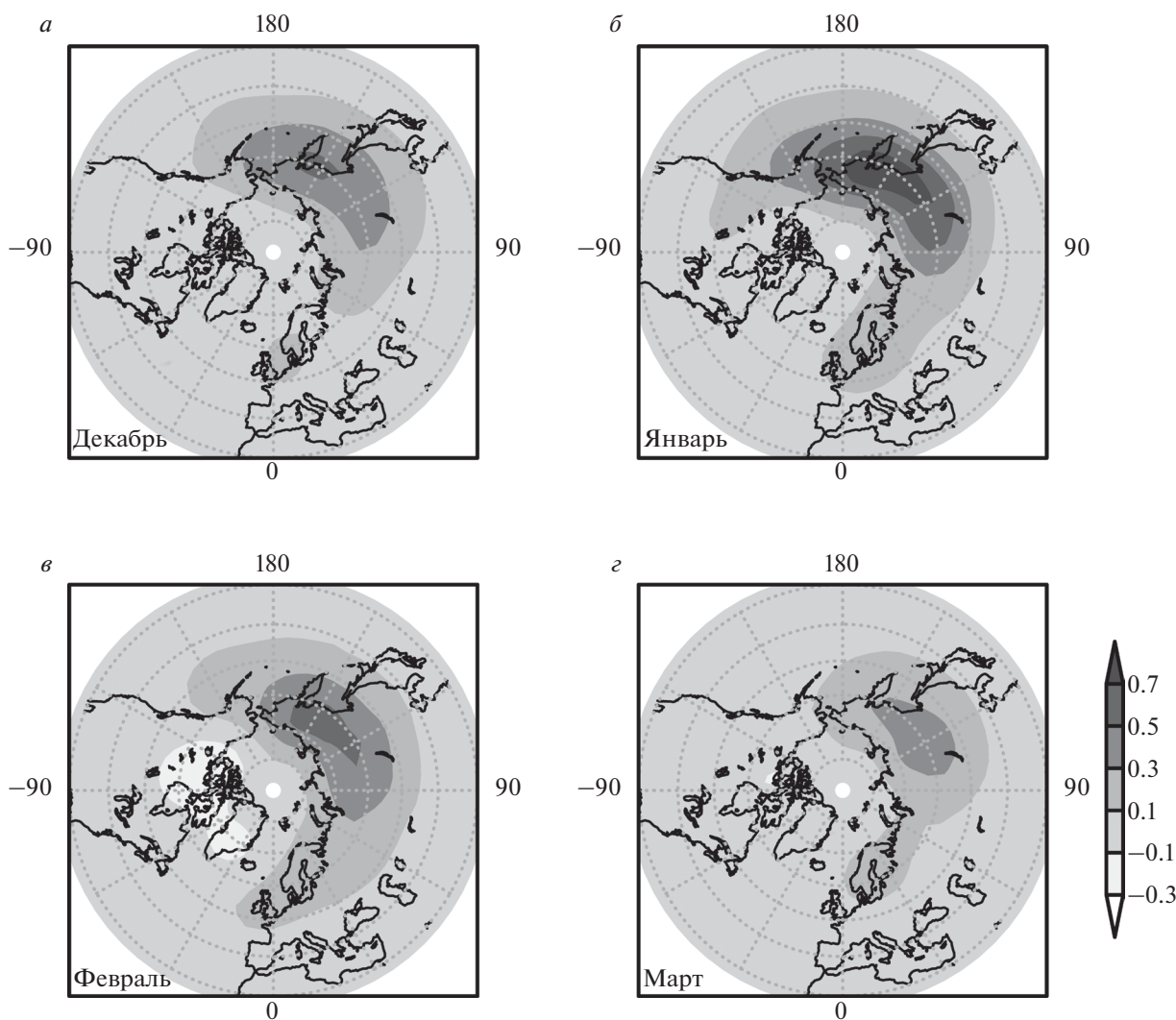


Рис. 2. Вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности ($\text{м}^2/\text{с}^2$), усредненная за 10 лет (2008–2017 гг.): (а) – декабрь, (б) – январь, (в) – февраль, (г) – март, высота 20 км. Данные JRA-55.

Таблица 1. Уровни значимости трендов в каждом секторе для исследуемых месяцев за период с 1958 по 2021 гг.

Сектор	Декабрь	Январь	Февраль	Март
I	не значим	5%	не значим	не значим
II	не значим	5%	не значим	10%
III	не значим	5%	не значим	не значим

На рис. 5 показаны результаты для января. Как и ожидалось, максимальные значения восходящей составляющей потока волновой активности наблюдаются во II секторе, но межгодовое усиление характерно не для каждого месяца. В январе, в свою очередь, увеличение потока волновой

активности из тропосферы в стратосферу характерно для всех секторов и тренд статистически значим при уровне значимости 5%.

При анализе усредненных значений с 1980 г. увеличивается значимость линейного тренда во II секторе, т.е. наблюдается усиление восходящей

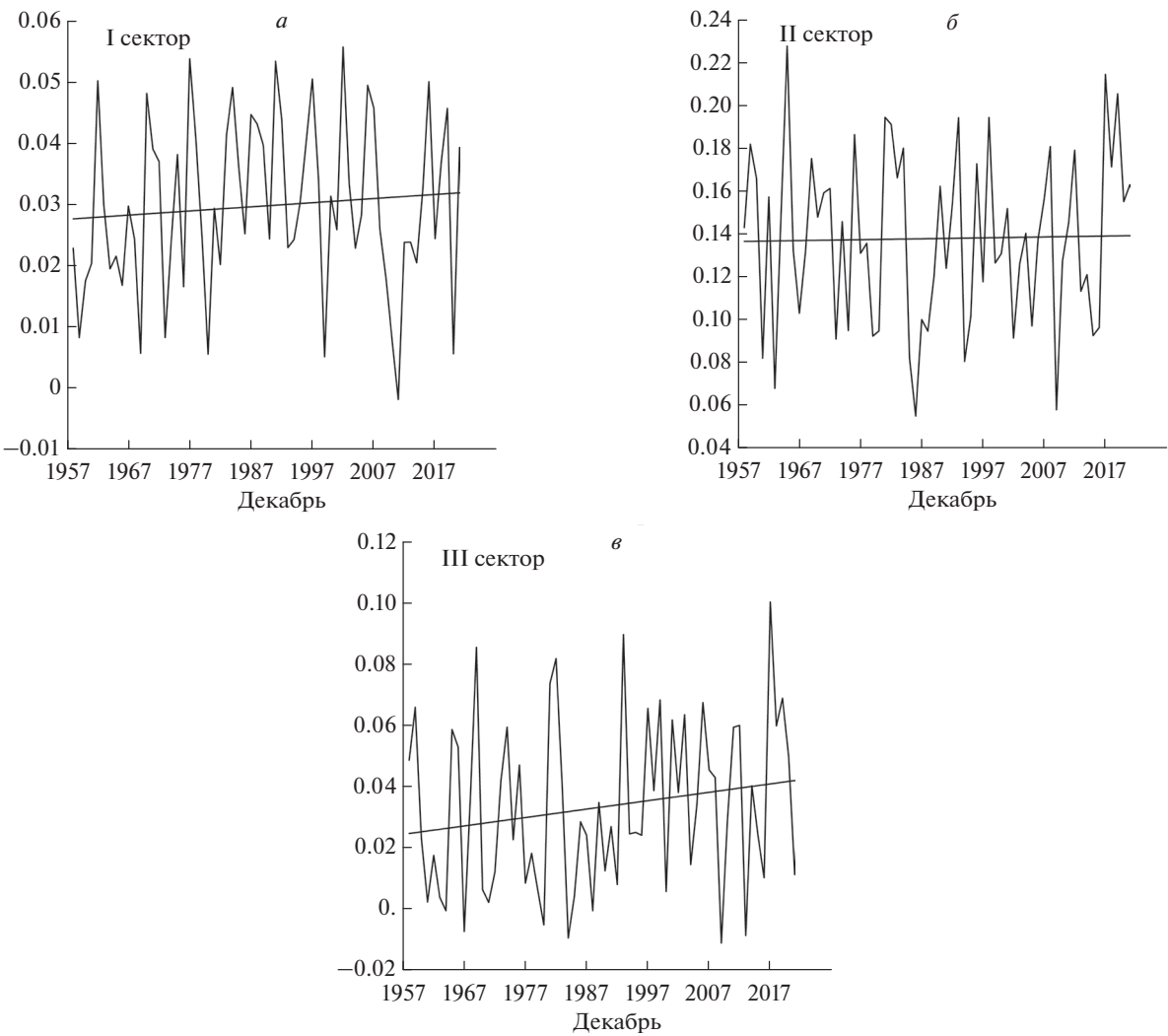


Рис. 3. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности за 64 года (1958–2021 гг.) для декабря на уровне 20 км, усредненной для: (а) – I сектора, (б) – II сектора, (в) – III сектора в полосе 37.5–77.5° N. Данные JRA-55.

Таблица 2. Уровни значимости трендов в каждом секторе для исследуемых месяцев за период с 1980 по 2021 гг.

Сектор	Декабрь	Январь	Февраль	Март
I	10%	20%	не значим	25%
II	не значим	1%	не значим	5%
III	не значим	не значим	не значим	не значим

ветви вертикальной составляющей потока Пламба. В I секторе статистическая значимость становится низкой (уровень значимости 20 %), а в III – тренд не значим. Кроме этого, в январе, наряду с декабрем, наблюдаются максимальные (для этого сектора) значения восходящего потока волновой активности в III секторе в 1980 и 1994 г.

Отсутствие статистически значимых трендов в феврале за период с 1958 по 2021 гг. показано на рис. 6. Выводы не меняются при анализе результатов расчета с 1980 г. Здесь стоит отметить, что за все исследуемые годы и месяцы, в феврале в I и III секторе наблюдаются максимальные значения нисходящего потока волновой активности

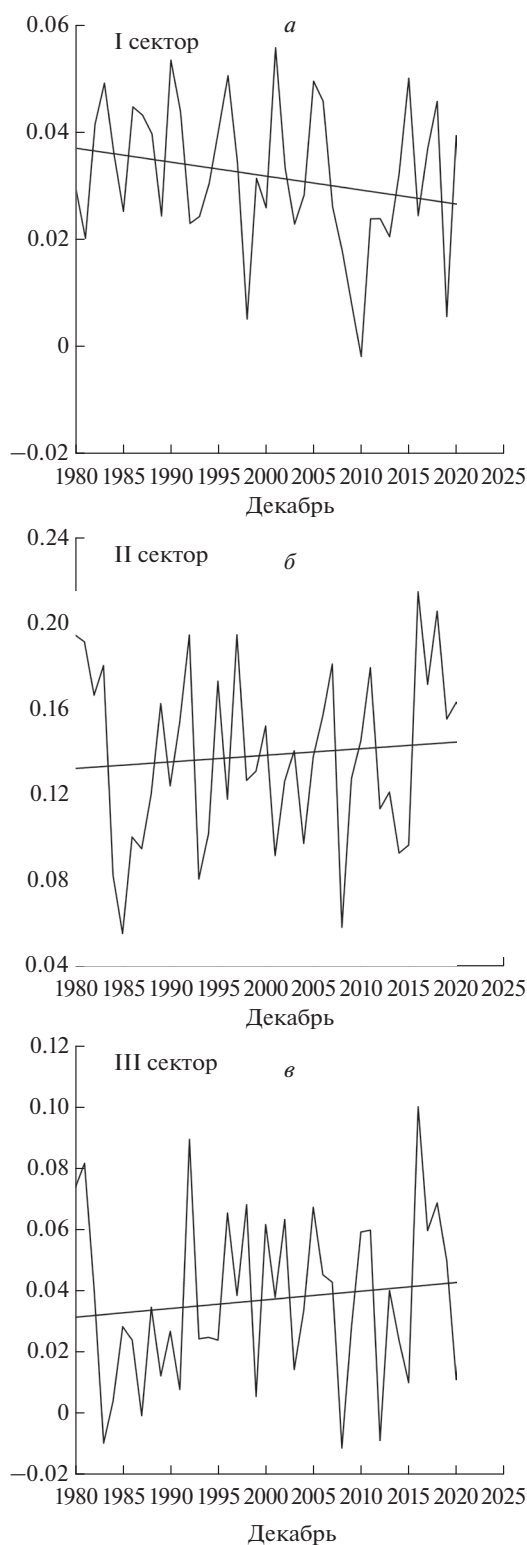


Рис. 4. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности за 1980–2021 гг. для декабря на уровне 20 км, усредненной для: (а) – I сектора, (б) – II сектора, (в) – III сектора в полосе 37.5–77.5° N. Данные JRA-55.

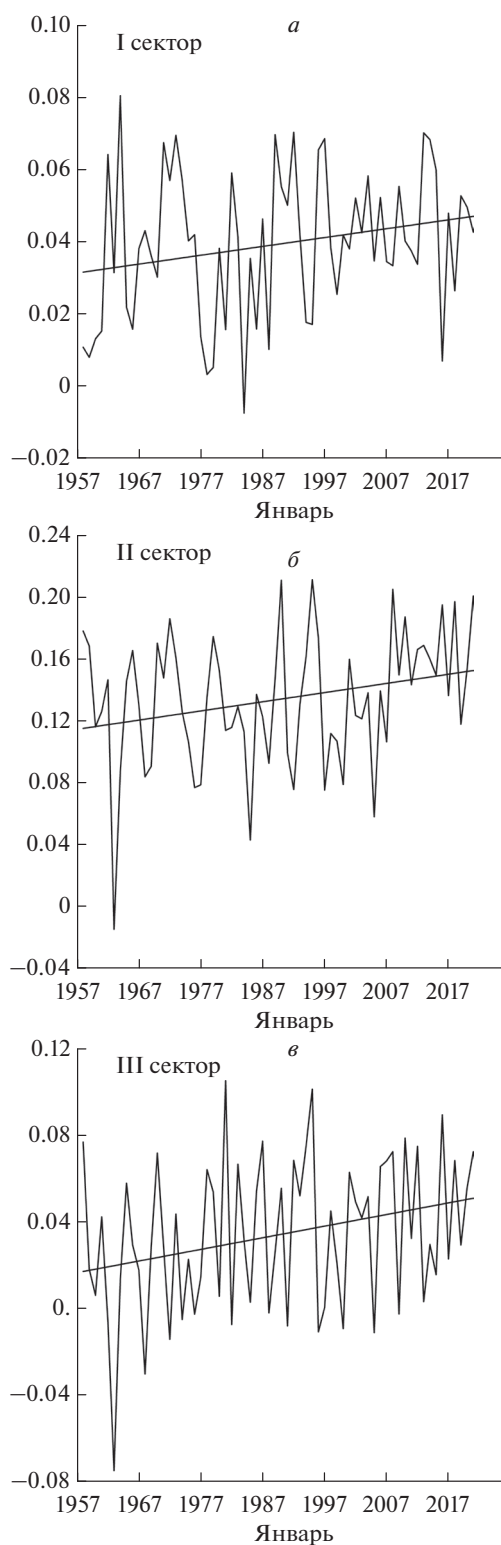


Рис. 5. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности за 64 года (1958–2021 гг.) для января на уровне 20 км, усредненной для: (а) – I сектора, (б) – II сектора, (в) – III сектора в полосе 37.5–77.5° N. Данные JRA-55.

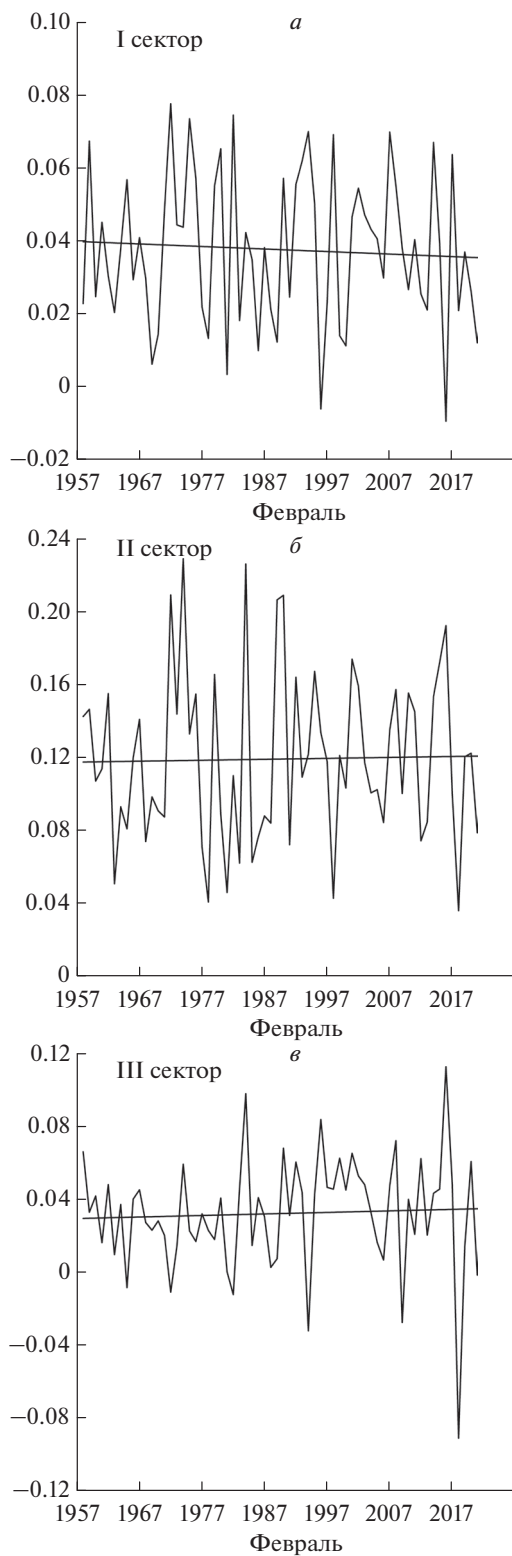


Рис. 6. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности за 64 года (1958–2021 гг.) для февраля на уровне 20 км, усредненной для: (а) – I сектора, (б) – II сектора, (в) – III сектора в полосе 37.5–77.5° N. Данные JRA-55.

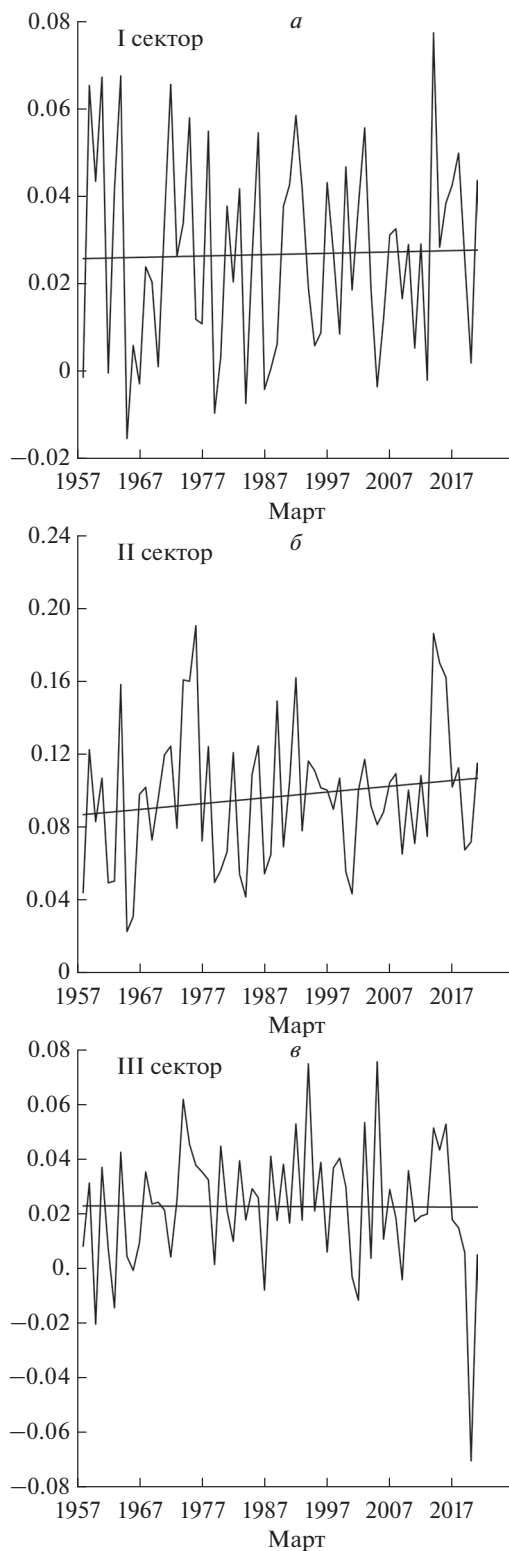


Рис. 7. Временная изменчивость вертикальной составляющей потока волновой активности за 64 года (1958–2021 гг.) для марта на уровне 20 км, усредненной для: (а) – I сектора, (б) – II сектора, (в) – III сектора в полосе 37.5–77.5° N. Данные JRA-55.

в 2015 г. и 2017 г. соответственно; максимальные значения потока волновой активности из тропосферы в стратосферу во II (1973 г. и 1989 г.) и в III секторах (2015 г.).

Результаты для марта на рис. 7 показывают увеличение восходящего потока волновой активности во II секторе за период с 1958 по 2021 гг. В I и III секторах линейный тренд статистически не значим. Значимость во II секторе увеличивается при анализе результатов с 1980 г., т.е. уровень значимости с 10% изменяется до 5%. Кроме этого, увеличивается статистическая значимость тренда в I секторе, но этого недостаточно для выводов о каких-либо климатических изменениях. В марте наблюдается пик восходящего потока волновой активности Пламба в I секторе в 2013 г.

5. ВЫВОДЫ

С целью исследования межгодовой изменчивости стратосферно-тропосферного взаимодействия, на основе данных реанализа была проанализирована вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности, рассчитанная с использованием подхода Пламба. Эта составляющая характеризует вертикальное распространение планетарных волн в атмосфере и является индикатором стратосферно-тропосферного обмена энергией и импульсом. Вертикальная компонента потока была усреднена по трем регионам Северного полушария для месяцев с декабря по март, и была проанализирована за 64-летний период с 1958 г. по 2021 г.

Статистические оценки рассчитанных трендов потоков волновой активности показали увеличение восходящей из тропосферы в стратосферу волновой активности в январе и марте над Дальним Востоком России. Здесь стоит отметить, что второй регион (из рассмотренных трех) характеризуется самыми высокими значениями вертикальной компоненты потока волновой активности. В связи с этим, полученное увеличение этой компоненты в данном регионе может приводить к возрастанию частоты формирования волн холода в тропосфере средних широт в январе и в феврале (в случае долгих ВСП) над умеренными широтами Восточной Азии [Huang et al., 2021]. Увеличение волновой активности в марте также подтверждается развитием минорных и главных, т.е. сопровождающихся изменением направления среднезонального ветра, ВСП в этом месяце, которые стали чаще наблюдаться в этом столетии. Чаще эти ВСП являются финальными, т.е. наблюдается динамический переход стратосферы в летний режим. В таких ситуациях наблюдается ранее разрушение стратосферного полярного

вихря и как следствие восполнение озонового слоя над полюсом. Межгодовое уменьшение восходящей компоненты потока с 1980 г. наблюдается только в декабре над европейской частью России, Европой и Ближним Востоком. Это, в свою очередь, может приводить к тому, что волны холода, как реакция на ослабление полярного вихря в момент ВСП в декабре, наблюдаются реже над Северной Европой [Kolstad et al., 2010; Tomassini et al., 2012]. Нисходящие потоки волновой активности наблюдаются над севером Северной Америки, но в некоторые годы регистрируются и в первом секторе, над Европой, с января по март.

Для анализа регионального влияния изменчивости потока волновой активности на температурный и ветровой режим необходимо учитывать различные фазы естественных долгопериодных осцилляций, например квазидвухлетнее колебание (КДК) зонального ветра в экваториальной стратосфере и/или Эль-Ниньо Южное колебание (ЭНЮК). Кроме этого, следствием анализа в работе среднемесячных данных является сглаживание возможных кратковременных периодов резкого изменения волновой активности на разных стадиях ВСП, а также исключение влияния гравитационных волн. Последние, в свою очередь, вносят вклад в “подготовку” стратосферного полярного вихря при формировании ВСП [Cullens and Thurairajah, 2021]. Поэтому для того, чтобы расширить исследование, для более детального изучения трендов волновой активности в дальнейшем планируется использовать результаты численного моделирования общей циркуляции атмосферы, в том числе с учетом различных комбинаций КДК и ЭНЮК.

6. ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда РФ, грант № 20-77-10006-П, <https://rscf.ru/project/20-77-10006/>.

7. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Варгин П.Н., Володин Е.М., Карпечко А.Ю., Погорельцев А.И. О стратосферно-тропосферных взаимодействиях // Вестник РАН. Т. 85. № 1. С. 39–46. 2015. <https://doi.org/10.7868/S0869587315010181>
- Гечайте И., Погорельцев А.И., Угрюмов А.И. Волновое взаимодействие стратосфера-тропосфера как предвестник аномальных похолоданий восточной ча-

- сти Балтийского региона // Ученые записки РГММУ. № 43. С. 129–139. 2016.
- Погорельцев А.И., Савенкова Е.Н., Перцев Н.Н. Внезапные стратосферные потепления: роль нормальных атмосферных мод // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 3. С. 387–403. 2014. <https://doi.org/10.7868/S0016794014020163>
- Смышляев С.П., Погорельцев А.И., Галин В.Я., Дробашевская Е.А. Влияние волновой активности на газовый состав стратосферы полярных районов // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 56. № 1. С. 102–116. 2016. <https://doi.org/10.7868/S0016794015060152>
- Andrews D.G., McIntyre M.E. Planetary waves in horizontal and vertical shear: the generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration // J. Atmos. Sci. V. 33. N 11. P. 2031–2048. 1976. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1976\)033<2031:PWIHAV>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1976)033<2031:PWIHAV>2.0.CO;2)
- Baldwin M., Birner T., Brasseur G., et al. 100 years of progress in understanding the stratosphere and mesosphere // Meteor. Mon. V. 59. N 27. P. 27.1–27.62. 2019. <https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPH-D-19-0003.1>
- Baldwin M., Dunkerton T. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes // Science. V. 294. N 5542. P. 581–584. 2001. <https://doi.org/10.1126/science.10633>
- Chan C.J., Plumb R.A. The response to stratospheric forcing and its dependence on the state of the troposphere // J. Atmos. Sci. V. 66. N 7. P. 2107–2115. 2009. <https://doi.org/10.1175/2009JAS2937.1>
- Charney J., Drazin P. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // J. Geophys. Res. V. 66. N 1. P. 83–109. 1961. <https://doi.org/10.1029/JZ066i001p00083>
- Chen P., Robinson W. Propagation of planetary waves between the troposphere and stratosphere // J. Atmos. Sci. V. 49. N 24. P. 2533–2545. 1992. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1992\)049<2533:POPWBT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<2533:POPWBT>2.0.CO;2)
- Cullens C.Y., Thurairajah B. Gravity wave variations and contributions to stratospheric sudden warming using long-term ERA5 model output // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 219. ID 105632. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105632>
- Gečaitė I. Climatology of three-dimensional Eliassen-Palm wave activity fluxes in the Northern Hemisphere stratosphere from 1981 to 2020 // Climate. V. 9. N 8. ID 124. 2021. <https://doi.org/10.3390/cli9080124>
- Gelaro R., McCarty W., Suarez M.J. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) // J. Climate. V. 30. N 14. P. 5419–5454. 2017. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Haynes P.H., McIntyre M.E., Shepherd T.G., Marks C.J., Shine K.P. On the “downward control” of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces // J. Atmos. Sci. V. 48. N 4. P. 651–678. 1991. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1991\)048<0651:OTCOED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1991)048<0651:OTCOED>2.0.CO;2)
- Haigh J.D., Blackburn M. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere // Space Sci. Rev. V. 125. N 1–4. P. 331–344. 2006. https://doi.org/10.1007/978-0-387-48341-2_26
- Haigh J.D., Blackburn M., Day R. The response of tropospheric circulation to perturbations in lower stratospheric temperature // J. Climate. V. 18. N 17. P. 3672–3691. 2005. <https://doi.org/10.1175/JCLI3472.1>
- Huang J., Hitchcock P., Maycock A.C. et al. Northern hemisphere cold air outbreaks are more likely to be severe during weak polar vortex conditions // Communications Earth & Environment. V. 2. ID 147. 2021. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00215-6>
- Jadin E.A., Wei K., Zyulyaeva Y.A., Chen W., Wang L. Stratospheric wave activity and the Pacific Decadal Oscillation // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. V. 72. N 16. P. 1163–1170. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.07.009>
- Karpechko A., Charlton-Perez A., Balmaseda M., Tyrrell N., Vitar F. Predicting sudden stratospheric warming 2018 and its climate impacts with a multimodel ensemble // Geophys. Res. Lett. V. 45. N 24. P. 13538–13546. 2018. <https://doi.org/10.1029/2018GL081091>
- Kobayashi Sh., Ota Y., Harada Y. et al. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics // J. Meteorol. Soc. Jpn. V. 93. N 1. P. 5–48. 2015. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2015-001>
- 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. Meteor. Soc. V. 136. N 649. P. 886–893. 2010. <https://doi.org/10.1002/qj.620>
- Koval A.V., Didenko K.A., Ermakova T.S., Gavrilov N.M., Kandieva K.K. Simulation of changes in the meridional circulation of the middle and upper atmosphere during transitional QBO phases / 28th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Tomsk, July 4–8, 2022. Proc. SPIE. V. 12341. ID 1234170. 2022a. <https://doi.org/10.1117/12.2643046>
- Koval A.V., Gavrilov N.M., Kandieva K.K., Ermakova T.S., Didenko K.A. Numerical simulation of stratospheric QBO impact on the planetary waves up to the thermosphere // Scientific Reports. V. 12. ID 21701. 2022b. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26311-x>
- Koval A.V., Toptunova O.N., Motsakov M.A., Didenko K.A., Ermakova T.S., Gavrilov N.M., Rozanov E.V. Numerical modeling of relative contribution of planetary waves to the atmospheric circulation // Atmos. Chem. Phys. V. 23. N 7. P. 4105–4114. 2023. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4105-2023>
- Liu H.L., Talaat E.R., Roble R.G., Lieberman R.S., Riggins D.M., Yee J.H. The 6.5-day wave and its seasonal variability in the middle and upper atmosphere // J. Geophys. Res. – Atmos. V. 109. N 21. ID D21112. 2004. <https://doi.org/10.1029/2004jd004795>
- Plumb R.A. On the Three-Dimensional Propagation of stationary waves // J. Atmos. Sci. V. 42. N 3. P. 217–229. 1985. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<0217:OTT DPO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<0217:OTT DPO>2.0.CO;2)

- Pogoreltsev A.I., Kanukhina A.Yu., Suvorova E.V., Savenkova E.N. Variability of planetary waves as a signature of possible climatic changes // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* V. 71. N 14–15. P. 1529–1539. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.05.011>
- Polvani L.M., Waugh D.W. Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes // *J. Climate.* V. 17. N 18. P. 3548–3554. 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<3548:UWAFAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<3548:UWAFAA>2.0.CO;2)
- Rakushina E.V., Ermakova T.S., Pogoreltsev A.I. Changes in the zonal mean flow, temperature, and planetary waves observed in the Northern Hemisphere mid-winter months during the last decades // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* V. 171. P. 234–240. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.005>
- Reichler T., Kushner P.J., Polvani L.M. The coupled stratosphere–troposphere response to impulsive forcing from the troposphere // *J. Atmos. Sci.* V. 62. N 9. P. 3337–3352. 2005. <https://doi.org/10.1175/JAS3527.1>
- Robock A. Stratospheric forcing needed for dynamical seasonal prediction // *B. Am. Meteorol. Soc.* V. 82. N 10. P. 2189–2192. 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2189:SFNFDS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2189:SFNFDS>2.3.CO;2)
- Scott R., Polvani L. Internal variability of the winter stratosphere // *J. Atmos. Sci.* V. 63. N 11. P. 2758–2776. 2006. <https://doi.org/10.1175/JAS3797.1>
- Solomon S., Rosenlof K.H., Portmann R.W., Daniel J.S., Davis S.M., Sanford T.J., Plattner G.K. Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming // *Science.* V. 327. N 5970. P. 1219–1223. 2010. <https://doi.org/10.1126/science.1182488>
- Thompson D.W.J., Furtado J.C., Shepherd T.G. On the tropospheric response to anomalous stratospheric wave drag and radiative heating // *J. Atmos. Sci.* V. 63. N 10. P. 2616–2629. 2006. <https://doi.org/10.1175/JAS3771.1>
- Tomassini L., Gerber E.P., Baldwin M.P., Bunzel F., Giorgetta M. The role of stratosphere–troposphere coupling in the occurrence of extreme winter cold spells over northern Europe // *J. Adv. Model. Earth Sy.* V. 4. N 4. ID M00A03. 2012. <https://doi.org/10.1029/2012MS000177>
- Vargin P.N., Koval A.V., Guryanov V.V. Arctic stratosphere dynamical processes in the winter 2021–2022 // *Atmosphere.* V. 13. N 10. ID 1550. 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13101550>
- Wei K., Ma J., Chen W., Vargin P.N. Longitudinal peculiarities of planetary waves–zonal flow interactions and their role in stratosphere–troposphere dynamical coupling // *Clim. Dynam.* V. 57. N 9–10. P. 2843–2862. 2021. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05842-5>
- Zyulyaeva Yu.A., Zhadin E.A. Analysis of three-dimensional Eliassen–Palm fluxes in the lower stratosphere // *Russ. Meteorol. Hydrol.* V. 34. N 8. P. 483–490. 2009. <https://doi.org/10.3103/S1068373909080019>

Trends of the Wave Activity Flux Vertical Component in the Northern Hemisphere

K. A. Didenko^{1, 2, *}, T. S. Ermakova^{2, 3, **}, A. V. Koval^{2, ***}, E. N. Savenkova^{3, ****}

¹Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia

²St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

³Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

*e-mail: didenko@izmiran.ru

**e-mail: taalika@mail.ru

***e-mail: a.v.koval@spbu.ru

****e-mail: savenkova.en@mail.ru

Long-term trends of three-dimensional wave activity Plumb's fluxes are studied using the JRA-55 global reanalysis of the atmosphere. The vertical component of wave activity Plumb's flux characterizes the propagation of atmospheric planetary waves generated in the troposphere into the upper atmosphere, and is used to analyze the stratosphere–troposphere dynamic interaction. The study of the wave activity flux was conducted for three latitudinal sectors of the Northern Hemisphere for months from December to March, over a 64-year period since 1958. It is shown that a statistically significant trend of wave activity flux from the troposphere to the stratosphere increase is observed over the Russian Far East in January and March. This can contribute to an increase in the frequency of cold waves formation in the middle latitudes troposphere. The study of stratosphere–troposphere dynamic interaction in general and wave activity fluxes in particular is necessary to task solution related to both global and regional climate changes and mixing of long-lived atmospheric components.