

## АНАЛИЗ МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ СТРАТОСФЕРНО–ТРОПОСФЕРНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ

К.А. Диденко<sup>1,2</sup>, Т.С. Ермакова<sup>2,3</sup>, А.В. Коваль<sup>2</sup>, Е.Н. Савенкова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, Троицк, Москва, Россия, didenko@izmiran.ru

<sup>2</sup> Санкт–Петербургский государственный университет, Санкт–Петербург, Россия

<sup>3</sup> Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт–Петербург, Россия

## ANALYSIS OF INTERANNUAL VARIATIONS OF STRATOSPHERE–TROPOSPHERE DYNAMIC COUPLING IN THE NORTHERN HEMISPHERE

К.А. Didenko<sup>1,2</sup>, Т.С. Ermakova<sup>2,3</sup>, А.В. Koval<sup>2</sup>, Е.Н. Savenkova<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Russia, didenko@izmiran.ru

<sup>2</sup> St. Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russia

**Аннотация.** По данным реанализа JRA–55 были рассчитаны и проанализированы трехмерные потоки волновой активности Пламба с целью анализа динамического взаимодействия в системе тропосфера–стратосфера–тропосфера. Усредненные за 64 года наблюдений значения вертикальной составляющей потока волновой активности в декабре, январе, феврале и марте позволили определить долготно–широтные области Северного полушария для изучения межгодовой изменчивости взаимодействия атмосферных слоев и оценки значимости полученных результатов. Показано, что в январе и марте над Дальним Востоком России наблюдается статистически значимый тренд на увеличение потока волновой активности из тропосферы в стратосферу.

**Ключевые слова:** волновая активность, поток Пламба, стратосферно–тропосферное взаимодействие

**Abstract.** Three–dimensional wave activity Plumb’s fluxes were calculated and analyzed using JRA–55 reanalysis data to examine the dynamic interaction in the troposphere–stratosphere–troposphere system. The vertical component of wave activity flux values averaged over 64 years of observations in December, January, February and March allowed us to determine the longitude–latitude regions in the Northern Hemisphere to study the interannual variability of interaction between atmospheric layers and to assess the significance of the results obtained. In January and March, there is a significant trend observed over the Russian Far East, corresponding to the increase in wave activity flux from the troposphere to the stratosphere.

**Keywords:** wave activity, Plumb’s flux, stratosphere–troposphere interaction

### ВВЕДЕНИЕ

Динамика тропосферы и стратосферы составляют единое целое и неразрывно связаны, 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]. В тропосфере крупномасштабная циркуляция, в основном, контролируется поглощением солнечной энергии, а в стратосфере главную роль играют волновые и вихревые структуры. 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].

Исследования тропосферно–стратосферных связей уже давно занимают центральное место в работах по атмосферной динамике и посвящены анализу как динамического, так и радиационного взаимодействия [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 [Jadin et al., 2010]. 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, 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.

### МЕТОДОЛОГИЯ

Потоки волновой активности с применением алгоритма Пламба обычно рассматриваются при анализе дивергенции потока в горизонтальной плоскости, распространения планетарных волн в атмосфере и их воздействия на зональную циркуляцию [Plumb, 1985]. Алгоритм Р.А. Пламба позволяет оценить направление распространения волнового пакета на трехмерной плоскости, что успешно применяется в изучении

вертикального распространения волн из стратосферы в тропосферу, и их отражения в обратном направлении. Трехмерный вектор потока волновой активности описывает распространение планетарных волн вдоль долготы ( $F_x$ ), широты ( $F_y$ ), высоты ( $F_z$ ):

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

где  $P$  — давление;  $P_0$  — давление, равное 1000 гПа;  $\Omega$  — угловая скорость вращения Земли;  $\lambda$  — долгота;  $\varphi$  — 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;  $\phi'$  — 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.

### ДАННЫЕ И ПОТОКИ ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТИ

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. Усредненные значения вертикальной составляющей потока за все годы наблюдений для декабря, января, февраля и марта в Северном полушарии на 20 км показали 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 потоков волновой активности Пламба из тропосферы в стратосферу. Нисходящие потоки волновой активности наблюдаются в некоторые годы 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 исследования межгодовой изменчивости вертикальной составляющей потока, построения и оценки линейного тренда. 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, к третьему (III) — Канада, Гренландия, США и Северная Атлантика.

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 и результаты получены отдельно для каждого месяца с декабря по март за период с 1958 по 2021 гг. Значения уровней значимости для всех секторов и месяцев за этот период представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Уровни значимости трендов в каждом секторе для исследуемых месяцев.

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

В декабре значения потока волновой активности во II секторе в 2 раза больше значений в III секторе и в 3–4 раза больше значений в I секторе. Такая ситуация характерна для всех рассматриваемых месяцев. 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., так как с 1980 г. данные реанализов, в том числе используемого в этой работе, были значительно улучшены посредством использования при ассимиляции спутниковых данных.

Результаты расчета и усреднения по секторам вертикальной составляющей потока волновой активности с 1980 г для декабря 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. В декабре в III секторе наблюдается один из максимумов усредненного восходящего потока волновой активности в 2017 г., хотя в этой области нисходящие потоки наблюдаются чаще.

В январе, 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 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.

Статистически значимые тренды в феврале за период с 1958 по 2021 гг. отсутствуют. Выводы не

меняются при анализе результатов расчета с 1980 г. Результаты для марта 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.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью исследования межгодовой изменчивости стратосферно-тропосферного взаимодействия на основе данных реанализов была проанализирована вертикальная составляющая трехмерного потока волновой активности, рассчитанная по алгоритму Пламба. Статистические оценки рассчитанных трендов потоков волновой активности показали увеличение восходящей из тропосферы в стратосферу волновой активности в январе и марте над дальним Востоком России. Межгодовое уменьшение восходящей компоненты потока с 1980 г. наблюдается только в

декабре над европейской частью России, Европой и Ближним Востоком.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда РФ, грант №23-77-01035, <https://rscf.ru/project/23-77-01035/>.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Baldwin M., Dunkerton T. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes // *Science*. 2001. N 294. P. 581–584.

Charney J., Drazin P. Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66, N 1. P. 83–109.

Jadin E.A., Wei K., Zyulyaeva Y.A. et al. Stratospheric wave activity and the Pacific Decadal Oscillation // *J. Atmos. Sol.–Terr. Phys.* 2010. V. 72. P. 1163–1170.

Kobayashi Sh., Ota Y., Harada Y. et al. The JRA–55 reanalysis: general specifications and basic characteristics // *J. Meteorol. Soc. Japan*. 2015. V. 93. P. 5–48.

Plumb R.A. On the Three-Dimensional Propagation of stationary waves // *J. Atmos. Sci.* 1985. V. 42, N 3. P. 217–229.

Solomon S., Rosenlof K.H., Portmann R.W. et al. Contributions of Stratospheric Water Vapor to Decadal Changes in the Rate of Global Warming // *Science*. 2010. V. 327, N 5970. P. 1219–1223.