

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ТРОПОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ С ЭПИЗОДАМИ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ

О.С. Кочеткова, В.И. Мордвинов, М.А. Руднева

### INVESTIGATION OF THE RELATIONSHIP BETWEEN TROPOSPHERIC PROCESSES AND SUDDEN STRATOSPHERIC WARMING

O.S. Kochetkova, V.I. Mordvinov, M.A. Rudneva

В работе представлены результаты анализа возникновения и эволюции внезапных стратосферных потеплений (ВСП), проведено сопоставление температурного режима в стратосфере с особенностями циркуляции тропосферы в зимние периоды 2008–2009 и 2012–2013 гг. Установлено, что ВСП предшествовало разрушению блокингов в Атлантике и Тихом океане, а также усилению орографических стационарных волн.

The paper presents the results of analysis of the possible origins of sudden stratospheric warming (SSW), comparison of temperature regime in the stratosphere with the tropospheric circulation at the winter of 2008–2009 and 2012–2013. We found that SSW's were preceded by the blocking destructions in the Atlantic and Pacific, and intensification of the orographic stationary waves in the troposphere.

#### Введение

Наиболее ярким динамическим процессом в зимней стратосфере являются внезапные стратосферные потепления (ВСП), во время которых температура в стратосфере может повышаться на десятки градусов. Как показано в работе [Мартазинова, Остапчук, 2001], при ВСП даже небольшое волновое возмущение способно инициировать тропосферный отклик в результате нелинейных взаимодействий и/или фокусировки трехмерного потока волновой активности. Поэтому прогноз ВСП имеет большое значение не только для предсказания состояния средней атмосферы, но и для долгосрочных прогнозов погоды. К сожалению, методики прогноза этого явления на уровне практического применения пока не существует.

Считается, что ВСП обусловлены волновым взаимодействием тропосферы и стратосферы [Matsumo, 1971]. Источниками крупномасштабных возмущений в тропосфере могут быть орографическое или термическое возбуждение, блокинги, собственные или вынужденные колебания в атмосфере [Charney, Drazin, 1961; Погосян, 1965; Schoeberl, 1978, Holton, 1980, Хелд, 1983]. Эффективность источников возбуждения может меняться со временем, кроме того, они могут быть связаны между собой, поэтому анализ и выделение процессов, ответственных за конкретные ВСП, представляет собой непростую задачу. Для ее решения необходим комплексный анализ тропосферных процессов в периоды, предшествующие ВСП, и во время ВСП. В представленной работе за два зимних периода выполнены оценки двух возможных источников возбуждения – орографических стационарных волн и блокингов.

#### Данные и методы

Для анализа пространственной картины развития стратосферных потеплений по данным NCEP/NCAR Reanalysis-1 за последовательные дни строились распределения температуры воздуха и относительных величин геопотенциала на изобарической поверхности 10 гПа.

Основными источниками орографических стационарных волн, имеющих максимальную амплитуду в северо-западных частях Тихого и Атлантического

океанов (районы наиболее частого возникновения ВСП), являются Тибет и Скалистые горы. Для оценки интенсивности орографического возбуждения стационарных волн мы использовали формулу

$$K = \left| U \frac{\partial h}{\partial x} + V \frac{\partial h}{\partial y} \right|, \quad (1)$$

где  $U$  и  $V$  – зональная и меридиональная составляющие вектора скорости ветра (м/с),  $h$  – высота над уровнем моря (м). При расчете производной по превышению учитывался модуль скорости ветра на уровне 700 гПа, характеризующем средний перенос в тропосфере. Значения параметра  $K$  усреднялись за январь над Тибетским плато (43–25° N, 75–103° E) и над Скалистыми горами (50–32° N, 90–120° W).

Для характеристики блокирующих процессов за каждый день рассчитывались индексы блокирования в средней тропосфере, которые определялись на уровне АТ-500 гПа:

$$GHGS = \frac{H_{500}(\varphi_0) - H_{500}(\varphi_s)}{\varphi_0 - \varphi_s}, \quad (2)$$

$$GHGN = \frac{H_{500}(\varphi_n) - H_{500}(\varphi_0)}{\varphi_n - \varphi_0}, \quad (3)$$

где  $\varphi_0=60^\circ$  N,  $\varphi_n=78.75^\circ$  N,  $\varphi_s=41.25^\circ$  N. К блокирующей относится ситуация, удовлетворяющая условию  $GHGS > 0$ ,  $GHGN < -5$ . Эти критерии должны сохраняться в течение  $\geq 5$  сут [D'Andrea, 1998].

Вариации рассчитываемых характеристик орографического возбуждения и индекса блокирования сопоставлялись с вариациями температуры в полярной области и аномалиями барического поля во время развития ВСП.

#### Основные результаты

В результате анализа стратосферных потеплений за период с 1975 по 2013 г. [Rudneva et al., 2013] были отобраны два случая ВСП, различных по интенсивности и пространственной локализации очагов потепления.

Зимой 2008–2009 гг. в середине января было зарегистрировано мажорное ВСП, очаг которого располагался над севером Атлантики (рис. 1, а). В январе

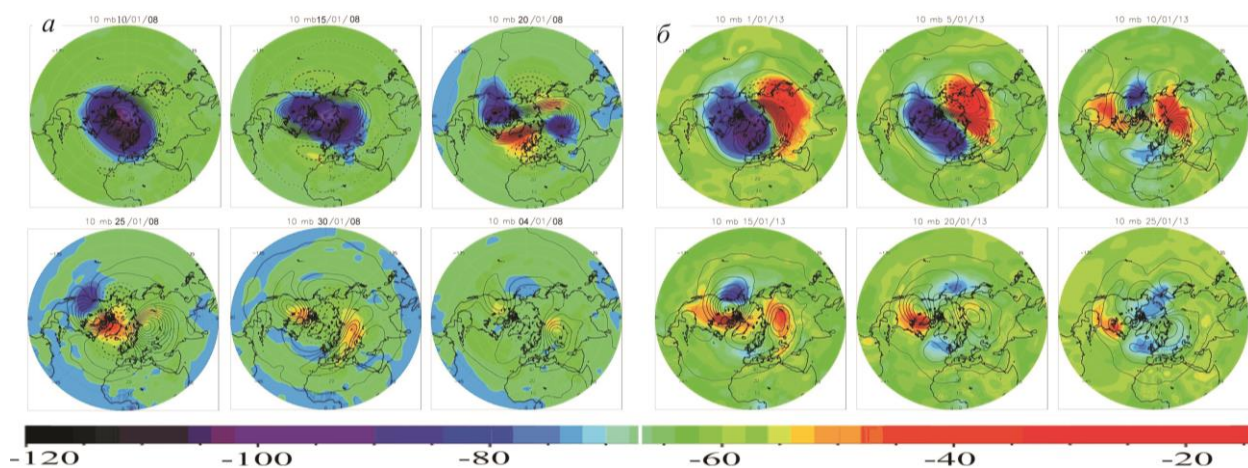


Рис. 1. Пространственное распределение температуры воздуха (заливка, °С) и относительных величин геопотенциала (изолинии) на уровне 10 гПа в январе 2009 г. (а) и январе 2013 г. (б).

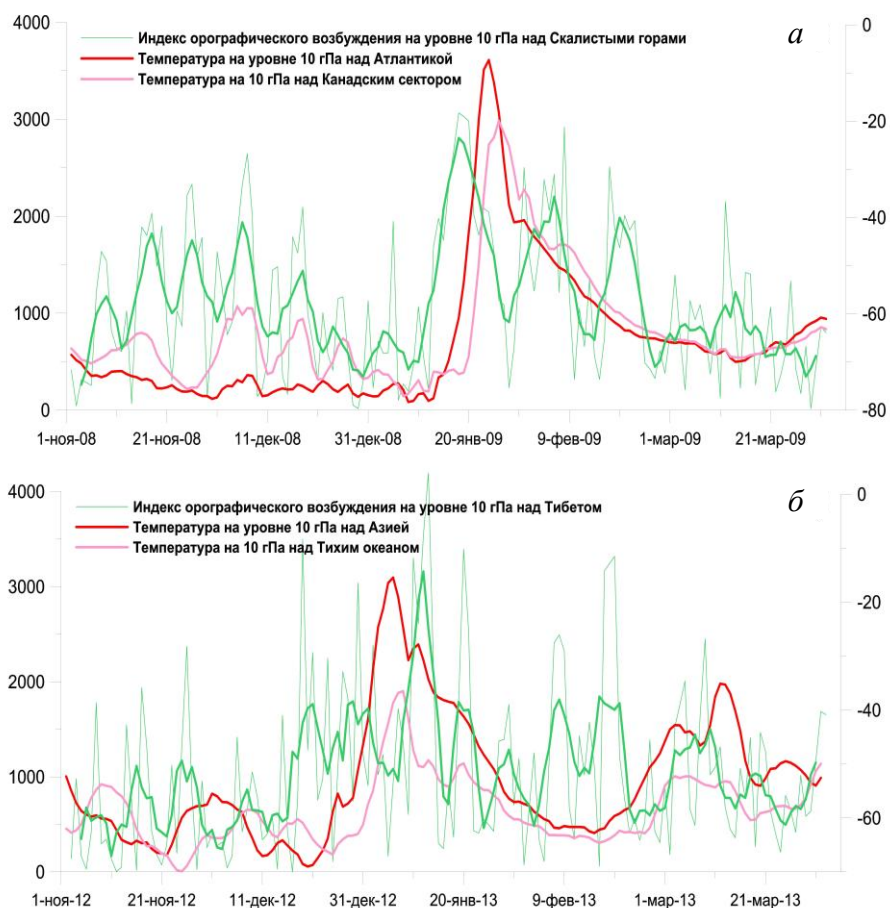


Рис. 2. Вариации индекса орографического возбуждения (зеленая линия) и температуры °С воздуха на уровне 10 гПа (красная линия) за период с ноября по март 2008–2009 гг. (а); 2012–2013 гг. (б).

2013 г. на фоне резкого повышения температур над полярной областью Азиатско-Тихоокеанского региона в стратосфере образовался антициклон, полярный вихрь при этом значительно ослаб и раздвоился (рис. 1, б). Подобный сценарий развития в целом характерен для мажорных внезапных стратосферных потеплений.

Так как очаги ВСП располагались в различных секторах полярной стратосферы, мы предположили, что и причины их возбуждения, скорее всего, долж-

ны быть локальными. Прежде всего, это могут быть орографические стационарные волны. Для проверки этого предположения мы сопоставили вариации температуры в стратосфере с изменениями индекса орографического возбуждения  $K$  в разных секторах Северного полушария. На рис. 2, а и б показаны вариации температуры в стратосфере за рассматриваемые периоды (красные линии) и вариации индекса орографического возбуждения (1) в нижней атмосфере на уровне 700 гПа (зеленые линии). Вариации

температуры рассчитывались над Атлантическим и Канадским секторами и сопоставлялись с индексом орографического возбуждения над Скалистыми горами в период с ноября по март 2008–2009 гг. Изменения температуры над Азиатским и Тихоокеанским секторами сопоставлялись с изменениями индекса над Тибетом зимой 2012–2013 гг.

Видно, что вариации индекса орографического возбуждения с небольшим сдвигом по времени неплохо согласуются с вариациями температуры в стратосфере, что особенно хорошо видно на примере потепления в январе 2009 г.: 19 января наблюдались максимальные значения индекса, а 22 января стратосферное потепление достигло максимального развития. Связь между вариациями температуры и орографическим индексом хорошо видна и зимой 2012–2013 гг. В конце декабря возросли значения индекса, а затем наблюдался рост температуры в стратосфере. Минорному потеплению в феврале также соответствовало возрастание индекса орографического возбуждения.

Для анализа блокингов по формулам (2), (3) рассчитывались меридиональные составляющие градиента геопотенциала на уровне 500 гПа, которые использовались в качестве количественного критерия блокирования в средней тропосфере. На рис. 3, 4 красным цветом показаны значения величины  $GHGS$ , удовлетворяющие условию  $GHGS > 0$  дкм/° широты, синим – значения  $GHGN < -5$  дкм/° широты. Черным цветом показано изменение температуры воздуха на уровне АТ-10 гПа. Индекс блокирования над Атлантикой определялся на уровне АТ-500 гПа для меридиана 30° W, над Тихим океаном вдоль 180° E, температура воздуха в стратосфере рассчитывалась для Атлантики над областью 60–90° N, 0–60° W, для Тихого океана над областью 150° E – 120° W.

Видно, что в зимний период 2008–2009 гг., когда очаг ВСП располагался в районе Атлантики, блокирующие процессы практически всю зиму отмечались

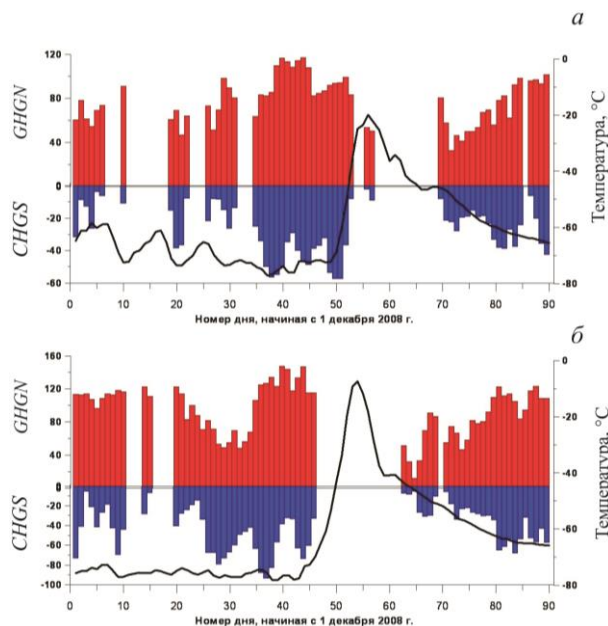


Рис. 3. Изменение температуры воздуха (°C) на уровне 10 гПа и меридиональных составляющих градиента геопотенциала на уровне АТ-500 гПа над Тихим океаном (а) и над Атлантикой (б).

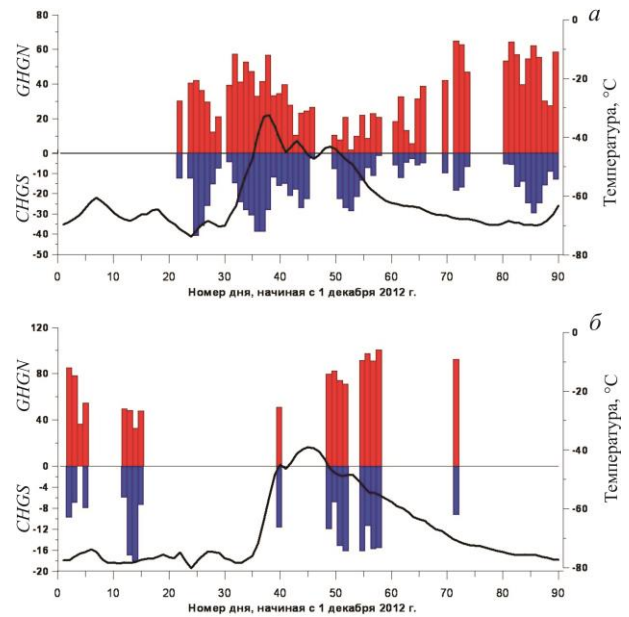


Рис. 4. Изменение температуры воздуха (°C) на уровне 10 гПа и меридиональных составляющих градиента геопотенциала на уровне АТ-500 гПа над Тихим океаном (а) и над Атлантикой (б).

в равном количестве в средней тропосфере над Тихим океаном и над Атлантикой (рис. 3). Стоит отметить, что процессы блокирования наблюдались на фазе роста и падения температуры, в период максимального развития ВСП в тропосфере преобладала зональная циркуляция. Для ВСП 2012–2013 гг. характерно развитие блокирующих ситуаций над Тихим океаном, над Атлантикой блокингов не отмечалось, а увеличение температуры было обусловлено, скорее всего, смещением очага ВСП с районов Тихого океана через полярную область Арктики.

### Заключение

Таким образом, установлено, что за несколько дней до начала ВСП наблюдается рост индекса орографического возбуждения в нижней тропосфере, что может использоваться в качестве предиктора для прогноза потеплений. Возникновение блокингов или их эволюция в некоторых секторах Северного полушария способствуют развитию ВСП, причем потепление начинается после разрушения блокирующих антициклонов. Зависимость ВСП одновременно от орографического возбуждения и блокингов можно объяснить влиянием блокирований на структуру струйных течений в районе горных массивов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Мартазинова В.Ф., Остапчук В.В. Особенности тропосферных и стратосферных атмосферных процессов при резких потеплениях и похолоданиях на территории Украины в теплый период года // Тр. УкрНИГМИ. 2001. Вып. 249. С. 24–34.

Погосян Х.П. Сезонные и внутрисезонные изменения температуры, геопотенциала и атмосферной циркуляции в стратосфере. М.: Наука, 1965. 111 с.

Хелд А. Теория стационарных и квазистационарных вихрей во внетропической тропосфере. М.: Мир, 1988. С. 144–189.

D'Andrea F., Tibaldi S., Blalackburn M., et al. Northern hemisphere atmospheric blocking as simulated by 15 atmospheric general circulation models in the period 1979–1988 // *Clim. Dynam.* 1998. V. 14. P. 385–407.

Charney J.G., Drazin P.G. Propagation of planetary scale waves from the lower atmosphere to the upper atmosphere // *J. Geophys. Res.* 1961. V. 66. P. 83–109.

Holton J.R. *An Introduction to Dynamic Meteorology*: Second edition. New York: Academic Press, 1979. 416 p.

Matsumo T. A dynamical model of the stratosphere sudden warming // *J. Atmos. Sci.* 1971. V. 28. P.1479–1494.

Rudneva M.A., Kochetkova O.S., Mordvinov V.I. Long-term variation in the characteristics of the Northern hemisphere sudden stratospheric warmings in 1975–2013 // *Proc. Int. Symp. «Atmospheric radiation and dynamics»*, Saint-Petersburg, 24–27 June, 2013. P. 130.

Schoeberl M.R. Stratospheric warmings: Observations and theory // *Rev. Geophys. Space Phys.* 1978. V. 16, iss. 4. P. 521–538.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*