

УДК 551.590.2

ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ЯНВАРЯ 2005 ГОДА В ВАРИАЦИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ СТРАТОСФЕРНОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ

© 2021 г. С. В. Веретененко*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 25.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 28.05.2021 г.

Исследованы изменения циркуляции высокоширотной стратосферы в связи с солнечными протонными событиями января 2005 г. В ходе событий обнаружено резкое увеличение интенсивности стратосферного полярного вихря. Возможным фактором интенсификации вихря являются изменения скорости ионизации, вызывающие изменения химического состава и, соответственно, температурного режима полярной стратосферы.

DOI: 10.31857/S0367676521090313

ВВЕДЕНИЕ

Стратосферный полярный вихрь представляет собой циклоническую циркуляцию, формирующуюся в полярных широтах выше уровня 500 гПа. Состояние вихря оказывает существенное влияние на развитие динамических процессов в тропосфере (например, [1]), что делает его важным связующим звеном между циркуляцией нижней атмосферы и солнечной активностью [2]. В области формирования вихря наблюдаются высокие скорости ионизации за счет космических лучей [3], создающие благоприятные условия для работы ряда физических механизмов солнечно-атмосферных связей, включающих изменения химического состава и температурного режима полярной атмосферы [4], а также электрических характеристик и облачности [5]. Нами исследованы изменения состояния вихря во время мощных солнечных протонных событий января 2005 г.

ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ ВЕТРА И СТРАТОСФЕРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ЯНВАРЕ 2005 ГОДА

В январе 2005 г. произошла серия мощных солнечных протонных событий (СПС), обусловленная ростом вспышечной активности на Солнце [6]. В ходе событий 15, 16 и 17 января регистрировались потоки частиц с энергиями 165–500 МэВ [7], достигающих высот стратосферы. Наиболее мощное событие с энергиями частиц выше 500 МэВ произошло 20 января и сопровождалось возраста-

нием скорости счета нейтронных мониторов (GLE) [6]. Исследуемые события привели к значительному увеличению скорости ионизации в верхней стратосфере высоких широт [8].

Поскольку полярный вихрь характеризуется резким усилением западного ветра в широтном поясе $\sim 50^\circ$ – 80° , для оценки его интенсивности использовались среднесуточные значения U -компоненты (направленной с запада на восток) скорости ветра в стратосфере по данным реанализа NCEP/NCAR [9]. На рис. 1а приведены максимальные значения скорости западного ветра U_{max} , наблюдаемые в области формирования вихря, в зимние месяцы 2004/2005 гг. Видно, что на всех уровнях стратосферы в период 15–23 января наблюдалось значительное усиление западного ветра. Отклонения U_{max} от трендовых значений составляло ~ 20 – 30 м \cdot с $^{-1}$ в верхней стратосфере (30–10 гПа) и ~ 15 м \cdot с $^{-1}$ в нижней (100–50 гПа). В то же время на всех уровнях стратосферы резко увеличивались площади областей, охваченных ветрами с высокими значениями скорости. На рис. 1б приведены площади S_{high} (в долях от общей площади земной поверхности) областей в верхней стратосфере, где скорость ветра превышала заданное значение. Видно, что в ходе СПС эти площади существенно возрастали. Кроме того, было обнаружено появление областей с экстремально высокими скоростями ветра, не наблюдавшимися до начала события (напр., на уровнях 50 и 100 гПа возникли области S_{extr} со скоростями

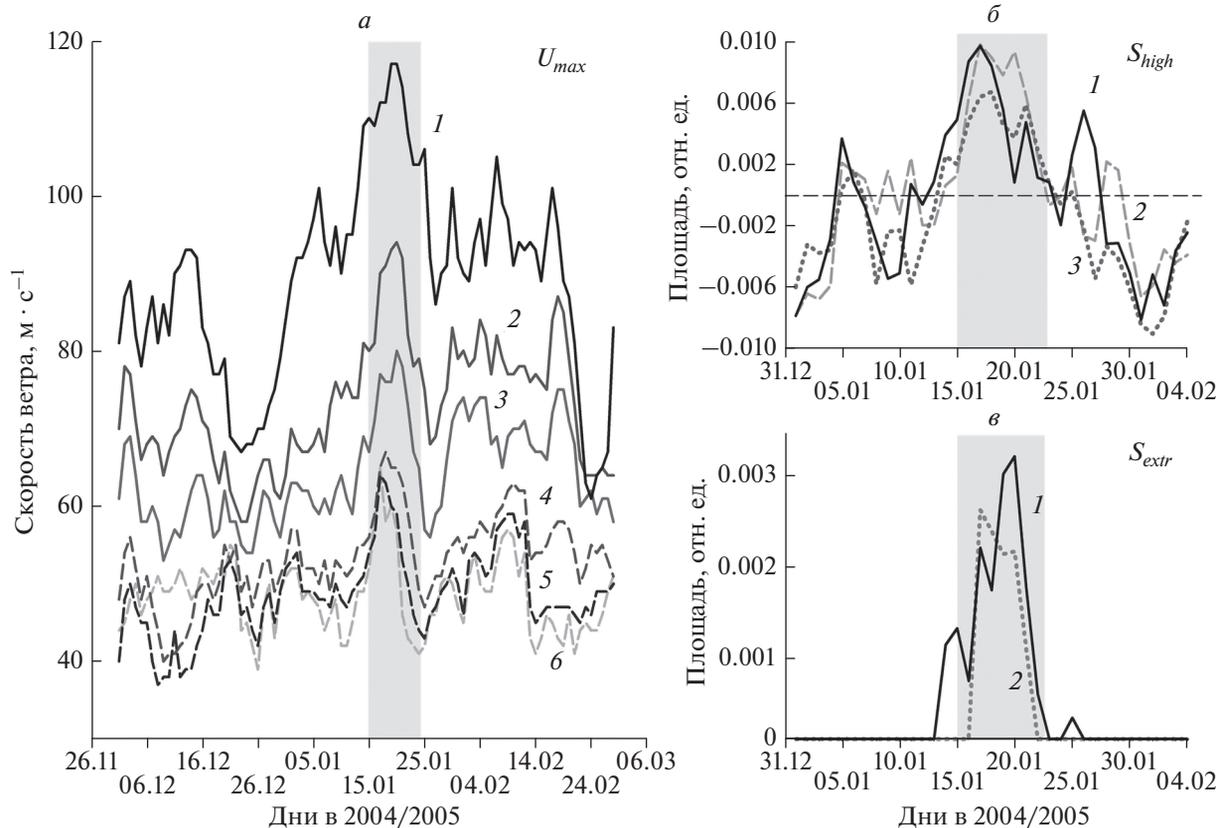


Рис. 1. Максимальные значения скорости западного ветра U_{max} в декабре–феврале 2004/2005 гг. на разных уровнях стратосферы: 1 – 10, 2 – 20, 3 – 30, 4 – 50, 5 – 70, 6 – 100 гПа (а). Вариации (отклонения от линейного тренда) площади областей с высокими значениями скорости ветра S_{high} в верхней стратосфере: 1 – 10 гПа ($U \geq 65 m \cdot s^{-1}$), 2 – 20 гПа ($U \geq 55 m \cdot s^{-1}$), 3 – 30 гПа ($U \geq 45 m \cdot s^{-1}$) (б). Вариации площади областей S_{extr} с экстремально высокими скоростями ветра $U \geq 105 m \cdot s^{-1}$ на уровне 10 гПа (1) и $U \geq 60 m \cdot s^{-1}$ на уровне 50 гПа (2) (в).

$U \geq 60 m \cdot s^{-1}$ и $U \geq 105 m \cdot s^{-1}$, соответственно (рис. 1в)). Приведенные данные свидетельствуют о значительном усилении стратосферного полярного вихря во время исследуемых СПС.

На рис. 2а показаны вертикальные профили среднесуточных значений скорости ионизации q в области геомагнитных широт 60° – 90° для 15, 16, 17 и 20 января 2005 г. по данным международной рабочей группы SOLARIS-NEPPA [10]. Там же приведены вариации (отклонения от среднего уровня 1–14 января) максимальных значений скорости западного ветра, осредненных за период СПС (15–20 января). Видно, что в верхней стратосфере возрастание скорости ионизации, обусловленное всплесками солнечных протонов, составляло от ~ 10 до нескольких сотен $cm^{-3} \cdot s^{-1}$. Вариации скорости западного ветра ΔU_{max} возрастали с высотой, как и скорости ионизации. На рис. 2б приведена зависимость максимальных значений скорости ветра U_{max} в верхней стратосфере (10 гПа) от скорости ионизации q на тех же высотах в январе 2005 г. по данным SOLARIS-NEPPA [10].

Видно, что при небольших значениях скорости ионизации ($q \sim 0.4 cm^{-3} \cdot s^{-1}$) U_{max} варьируется в широком диапазоне (от ~ 80 до $\sim 110 m \cdot s^{-1}$), однако при больших значениях q скорость ветра возрастает с увеличением скорости ионизации до $\sim 120 m \cdot s^{-1}$.

На рис. 2в вариации скорости ветра ΔU_{max} в январе 2005 г. сопоставлены с рассчитанными аналогичным образом вариациями скорости ветра (отклонениями средних значений U_{max} в области формирования вихря за 15–20 января от средних значений за предыдущий период 1–14 января) для трех лет (2003, 2006 и 2007 гг.), когда в январе протонных событий не наблюдалось [6]. Как видно из рисунка, при отсутствии СПС скорость ветра может как возрастать, так и ослабевать по сравнению с предыдущим периодом, при этом отклонения ΔU_{max} лежат в пределах примерно $\pm 5 m \cdot s^{-1}$, а также по-разному изменяются с увеличением высоты. Для профиля ΔU_{max} в январе 2005 г., наоборот, характерен устойчивый рост вариаций скорости ветра с высотой и их амплитуда достаточно высока

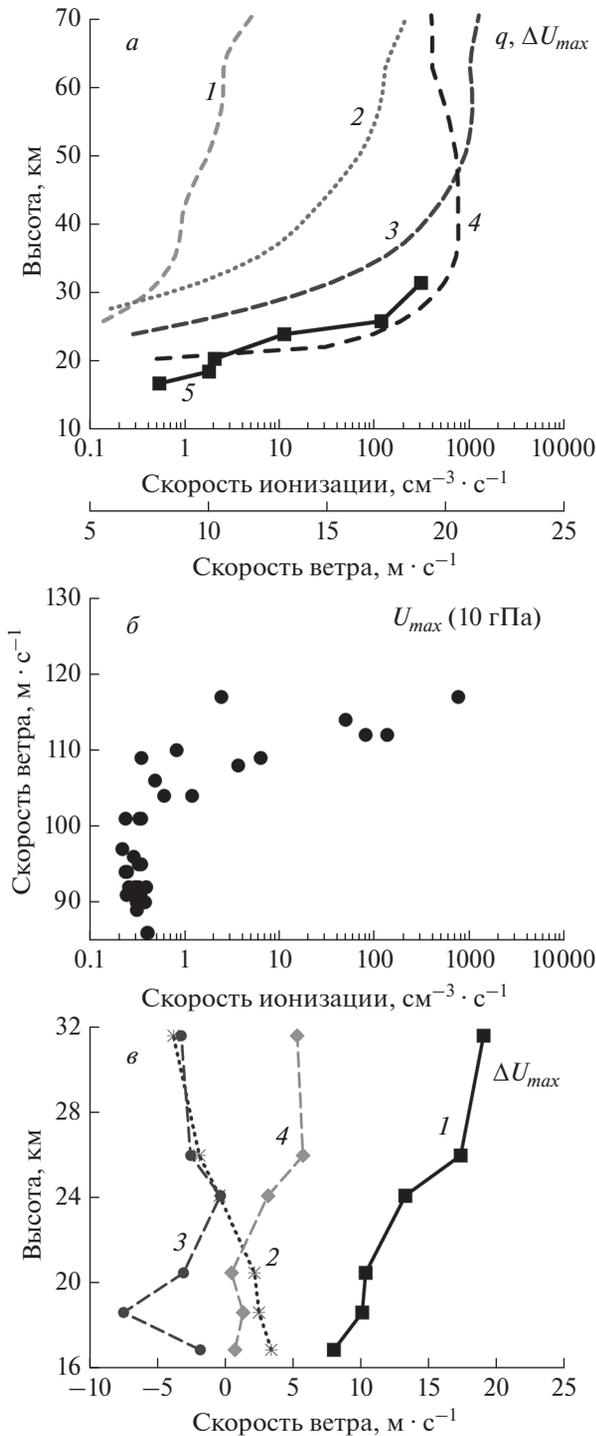


Рис. 2. Среднесуточные значения скорости ионизации q в области геомагнитных широт 60° – 90° [10]: 1 – 15 января, 2 – 16 января, 3 – 17 января и 4 – 20 января 2005 г. Сплошная линия с черными квадратами (5) показывает вариации максимальных значений скорости западного ветра ΔU_{max} (а). Зависимость U_{max} на уровне 10 гПа от среднесуточных значений скорости ионизации в верхней стратосфере (35 км) [10] в январе 2005 г. (б). Вариации максимальных значений скорости западного ветра ΔU_{max} в январе в ходе СПС 2005 г. (1) и при отсутствии СПС: 2 – 2003 г., 3 – 2006 г., 4 – 2007 г. (в).

(от ~ 8 – $13 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в нижней стратосфере до $\sim 20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ в верхней). Таким образом, данные, приведенные на рис. 2, позволяют предположить, что рост интенсивности стратосферного полярного вихря в январе 2005 г. действительно был связан с увеличением скорости ионизации в средней атмосфере в результате вторжения солнечных протонов.

О ВОЗМОЖНОМ ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ЭФФЕКТОВ СПС

Увеличение скорости ветра в вихре свидетельствует об увеличении температурных контрастов между полярными и умеренными широтами. Возможной причиной такого увеличения являются изменения радиационно-теплового баланса полярной атмосферы вследствие изменения химического состава. Рост скорости ионизации в средней атмосфере способствует более интенсивному образованию окислов азота и водорода, участвующих в каталитических циклах разрушения озона. В период СПС января 2005 г. наблюдалось уменьшение содержания озона на 20–60% в мезосфере на высотах 60–70 км и на 10% в верхней стратосфере на высотах ~ 40 км [8]. Озон в условиях полярной ночи действует как парниковый газ, поскольку имеет ряд колебательно-вращательных полос поглощения в инфракрасной области [11]. Таким образом, уменьшение содержания озона способствует выхолаживанию полярной стратосферы и мезосферы, что может привести к увеличению меридиональных градиентов температуры и, соответственно, увеличению скорости западного ветра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено резкое увеличение скорости западного ветра в стратосфере высоких широт, свидетельствующее об интенсификации стратосферного полярного вихря, во время серии протонных событий января 2005 г. Возможным фактором интенсификации вихря является значительный рост скорости ионизации, вызывающий изменения химического состава и температурного режима полярной атмосферы. Полученные результаты свидетельствуют о влиянии мощных солнечных протонных событий на циркуляцию средней атмосферы.

Автор выражает благодарность Базилевской Г.А. (ФИАН) и анонимному рецензенту за полезные рекомендации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Walter K., Graf H.-F. // *Atm. Chem. Phys.* 2005. V. 5. P. 239.
2. Veretenenko S., Ogurtsov M. // *Adv. Space Res.* 2019. V. 64. P. 104.

3. *Stozhkov Yu.I., Svirzhevsky N.S., Bazilevskaya G.A. et al.* // *Adv. Space Res.* 2009. V. 44. P. 1124.
4. *Криволицкий А.А., Репнев А.И.* Воздействие космических факторов на озоносферу Земли. М.: ГЕОС, 2009. 384 с.
5. *Tinsley B.A.* // *Rep. Progr. Phys.* 2008. V. 71. Art. No. 66801.
6. *Logachev Yu.I., Bazilevskaya G.A., Vashenyuk E.V. et al.* Catalogue of solar proton events in the 23-rd cycle of solar activity (1996–2008). М., 2016.
7. <http://spidr.ngdc.noaa.gov>.
8. *Jackman C.H., Marsh D.R., Vitt F.M. et al.* // *Atm. Chem. Phys.* 2011. V. 11. P. 6153.
9. *Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al.* // *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 1996. V. 77. P. 437.
10. <https://solarisheppa.geomar.de/solarprotonfluxes>.
11. *Перов С.П., Хргиан А.Х.* Современные проблемы атмосферного озона. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 287 с.

Effects of solar proton events of January 2005 on intensity of the stratospheric polar vortex

S. V. Veretenenko*

Ioffe Institute of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia

**e-mail: s.veretenenko@mail.ioffe.ru*

Circulation changes of the high-latitude stratosphere associated with solar proton events of January 2005 were investigated. A sharp increase of intensity of the stratospheric polar vortex was found in the course of the studied events. A possible factor of the vortex intensification may be ionization changes resulting in changes of chemical composition and, then, temperature regime of the polar stratosphere.