

УДК 551.590.21, 551.590.29

## ВЛИЯНИЕ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВАРИАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА ЭВОЛЮЦИЮ БАРИЧЕСКИХ СИСТЕМ УМЕРЕННЫХ И ВЫСОКИХ ШИРОТ

И.В. Артамонова

### INFLUENCE OF SHORT-TERM VARIATIONS IN GALACTIC COSMIC RAY INTENSITY ON THE EVOLUTION OF MID- AND HIGH-LATITUDE BARIC SYSTEMS

I.V. Artamonova

Исследованы вариации атмосферного давления в районе Северной Атлантики во время резких понижений интенсивности галактических космических лучей, известных как форбуш-понижения. Обнаружен значительный рост давления над Скандинавией и севером Европейской части России с максимумом на 3–4 день относительно дня начала форбуш-понижения. Показано, что причиной роста давления в указанном регионе является формирование блокирующего антициклона в области климатического положения арктического фронта и резкое замедление движения североатлантических циклонов в восточном направлении. Предполагается, что высокоэнергичные частицы, выпадающие в областях климатического положения арктического (частицы с энергией  $E \sim 20\text{--}80$  МэВ) и полярного (частицы с энергией  $E \sim 2\text{--}3$  ГэВ) фронтов, могут быть вовлечены в процессы, влияющие на эволюцию циклонов и антициклонов в данных регионах.

Variations of atmospheric pressure in the North Atlantic region during Forbush decreases in galactic cosmic rays were investigated. A noticeable pressure growth with the maximum on the 3<sup>rd</sup>–4<sup>th</sup> days after the Forbush decrease onset was revealed over Scandinavia and the north of European Russia. It was shown that the observed pressure growth was caused by the blocking anticyclone formation in the climatic Arctic front and by the sudden stop of eastward movement of North-Atlantic cyclones. It is suggested that particles, which precipitate in the region of climatic position of the Arctic ( $E \sim 20\text{--}80$  MeV) and Polar ( $E \sim 2\text{--}3$  GeV) fronts, may be involved in processes, which influence cyclone and anticyclone formation and development.

#### Введение

В настоящее время предполагается, что вариации галактических космических лучей (ГКЛ) играют важную роль в физическом механизме влияния солнечной активности на тропосферную циркуляцию, погоду и климат. Уменьшение циклонической завихренности в умеренных широтах обнаружено в связи с короткопериодными изменениями (форбуш-понижениями) потока ГКЛ [1]. Также показано, что форбуш-понижения ГКЛ сопровождаются увеличением давления с максимумом на +3/+4-й день после начала события, по данным аэрологических зондирований в Соданкюле (Финляндия,  $\varphi \approx 67^\circ$  N) [2], что согласуется с изменениями зонального давления в области широт  $50\text{--}75^\circ$  N [3]. Цель данной работы – исследовать, какими процессами обусловлены изменения давления в области умеренных и высоких широт, наблюдаемые во время форбуш-понижений ГКЛ.

#### Анализ экспериментальных данных

Для исследования эффектов форбуш-понижений ГКЛ в вариациях давления нижней атмосферы использовались среднесуточные значения геопотенциальных высот основных изобарических уровней 1000, 850, 700, 500, 300 и 200 гПа по данным реанализа NCEP/NCAR [4]. Исследование проводилось методом наложения эпох (МНЭ) для 48 событий, отобранных в течение холодного полугодия (октябрь–март) за период 1980–2006 гг. Одним из критериев отбора было также отсутствие значительного возмущающего влияния всплесков солнечных космических лучей: из рассмотрения исключались те форбуш-понижения, сопровождаемые потоками СКЛ, интенсивность которых превышала  $I > 100$  протон·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>·ср<sup>-1</sup> для частиц с энергией  $E > 10$  МэВ. Для анализа МНЭ рассчитывались отклонения высот изобарических поверхностей от невозмущенного уровня, полученного осреднением по 10 дням, предшествующим началу события.

На рис. 1. приведены средние изменения высоты изобарической поверхности 1000 гПа в ходе исследуемых форбуш-понижений. Нулевой день соответствует дню начала события. Белые линии ограничивают области, где значимость отклонений превышает 0.95 и 0.99 согласно  $t$ -критерию Стьюдента. Приведенные данные показывают, что сразу после начала форбуш-понижения (0/+1 день) наблюдается увеличение давления около южного побережья Гренландии. Затем область положительных отклонений давления распространяется к северо-востоку и

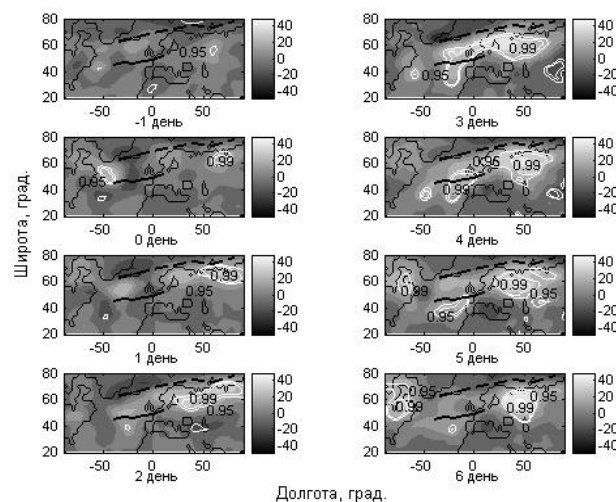


Рис. 1. Вариации геопотенциальной высоты (в геопотенциальных метрах) изобарического уровня 1000 гПа, полученные методом наложения эпох, в течение 48 форбуш-понижений ГКЛ, отобранных за холодное полугодие (октябрь–март) 1980–2006 гг. Белыми линиями ограничены области, где статистическая значимость отклонений превышает 0.95 и 0.99 согласно  $t$ -критерию Стьюдента. Черными линиями на карте обозначено среднее многолетнее положение арктического (штриховая линия) и полярного (сплошная линия) климатических фронтов в январе, согласно [7].

через 2–3 дня после начала события охватывает умеренные и субполярные широты Северной Атлантики от восточного побережья Гренландии до Скандинавии, а также побережье Северного Ледовитого океана. Отклонения от невозмущенного уровня в районе арктического побережья достигают 60–70 геопотенциальных метров (значимость 0.99). Статистически значимое увеличение давления наблюдается также над Атлантическим океаном у западных берегов Европы. Обнаружено, что аналогичное увеличение высот изобарических поверхностей в связи с исследуемыми форбуш-понижениями охватывает всю тропосферу, однако статистическая значимость эффекта максимальна у поверхности Земли и убывает с высотой. Наибольшие изменения давления на всех уровнях тропосферы наблюдаются на +3/+4-й день после начала события. Оценка статистической значимости по методу Монте-Карло для +3/+4-го дней после начала события показала, что величина отклонений в этот период превышает 2.8 стандартные ошибки.

На рис. 1 также обозначено согласно [7] среднее многолетнее положение основных атмосферных фронтов: арктического фронта (черная пунктирная линия), разделяющего арктический воздух и воздух умеренных широт, и полярного фронта (черная сплошная линия), разделяющего воздух умеренных широт и тропический. Основные фронты представляют особый интерес, так как именно с ними связаны образование и наибольшие изменения в эволюции внетропических циклонов и антициклонов [5]. Действительно, как видно из рис. 1, наиболее значимые положительные отклонения давления в ходе форбуш-понижений ГКЛ наблюдаются в районах наиболее вероятного формирования основных атмосферных фронтов, т. е. в районах наиболее интенсивного циклогенеза. Это позволяет предположить, что наблюдаемые изменения давления в тропосфере обусловлены изменениями в эволюции фронтальных циклонов и антициклонов в связи с исследуемыми событиями.

Для изучения причин наблюдаемого повышения давления в районе климатического арктического фронта, проходящего над Северной Атлантикой и побережьем Северного Ледовитого океана, был проведен синоптический анализ приземных карт погоды. Данные синоптического анализа показывают, что в связи с исследуемыми форбуш-понижениями ГКЛ в районе арктического фронта наблюдается интенсивное преобразование так называемых подвижных холодных антициклонов (сформированных в тылу холодного фронта циклона) в малоподвижные обширные антициклоны, блокирующие западный перенос (так называемые блокирующие антициклоны). Этот процесс приводит к замедлению движения (или остановке) и ослаблению циклонов,двигающихся в зональном потоке в восточном направлении, что еще больше способствует росту давления над Северной Европой.

Расчитанные согласно [6] жесткости геомагнитного обрезания, соответствующие областям наиболее интенсивного циклогенеза, варьируются в диапазоне от ~0.2 ГВ до ~0.4 ГВ (район арктического фронта) и от ~2 ГВ до ~3.5 ГВ (район полярного фронта), что соответствует энергиям ~20–80 МэВ и ~2–3 ГэВ. На рис. 2 карта жесткости геомагнитного обрезания, наложенная на карту изменений высоты

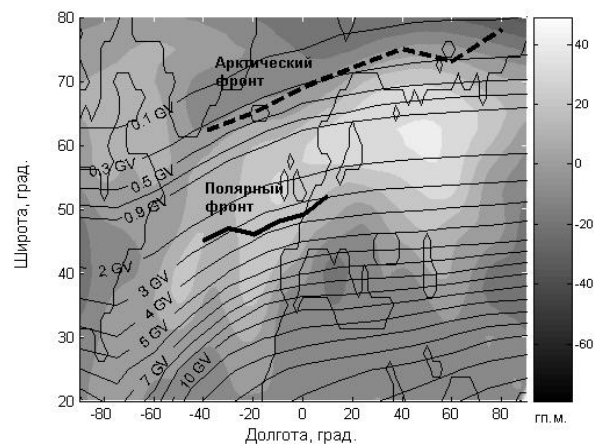


Рис. 2. Вариации геопотенциальной высоты (в геопотенциальных метрах) изобарического уровня 1000 гПа на +4 день после начала форбуш-понижения, наложенные на карту жесткости геомагнитного обрезания в соответствии с [6], и среднее многолетнее положение арктического и полярного климатических фронтов в январе, согласно [7].

поверхности 1000 гПа, наблюдаемых на +4-й день после начала форбуш-понижения (день максимальных изменений давления), сопоставлена со средним многолетним положением основных атмосферных фронтов согласно [7]. Как видно из рисунка, интересующие нас основные атмосферные фронты расположены в зонах высыпания частиц с энергиями выше ~20–80 ГэВ (арктический фронт) и ~2–3 ГэВ (полярный фронт). Интенсивность высыпающихся в земную атмосферу космических частиц с такими энергиями достаточно сильно модулируется солнечной активностью, что позволяет рассматривать их как наиболее вероятное звено, связывающее солнечную активность и явления в нижней атмосфере. Усиление антициклонической активности в регионах высыпания частиц с указанными энергиями является дополнительным доказательством того, что вариации потоков этих частиц могут быть вовлечены в физический механизм влияния солнечной активности на процессы формирования и развития внетропических барических систем.

### Заключение

В результате выполнения данной работы обнаружен значительный рост давления в умеренных и средних широтах во время форбуш-понижений ГКЛ. Наибольший статистически значимый эффект наблюдается в районе положения основных климатических фронтов: арктического и полярного.

Полученные результаты согласуются с данными [1–3], свидетельствующими об уменьшении циклонической завихренности и повышении зонального давления в умеренных широтах в связи с указанными вариациями ГКЛ. Таким образом, изменения давления, связанные с форбуш-понижениями ГКЛ могут объясняться изменениями интенсивности циклонической активности (т. е. процессами формирования и развития внетропических барических систем: циклонов и антициклонов) во фронтальных зонах.

Мы предполагаем, что частицы космических лучей, имеющие энергию, необходимую для того, что-

бы достигнуть геомагнитных широт арктического ( $E \sim 20-80$  МэВ) и полярного ( $E \sim 2-3$  ГэВ) фронтов, могут играть значительную роль в механизмах формирования и развития барических систем в указанных регионах.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Tinsley B.A., Deen G.W. Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: a connection via electrofreezing of supercooled water in high-level clouds? // *Journal of geophysical research*, 1991, V. 96, N. 12. P. 283–296.
2. Pudovkin M.I., et al. Meteorological characteristic changes in the high-latitude atmosphere associated with forrush-decreases of galactic cosmic rays // *Advances of space research*, 1997. V. 20, N. 6. P. 1169–1172.
3. Pudovkin M.I., Babushkina S.V. Influence of solar flares and disturbances of the interplanetary medium on the atmospheric circulation // *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics*, 1992. V. 54, N. 7/8. P. 841–846.
4. Kalnay E., et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project // *Bulletin of American Meteorological Society*. 1996. V. 77. P. 437–472.
5. Воробьев В.И. Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 550 с.
6. Shea M.A., Smart D.F., A world grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for 1980 // 18<sup>th</sup> International cosmic ray conference papers. 1983. V. 3. P. 415–418.
7. Хромов С.П., Петросьянц М.А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 1994. 520 с.

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург*