
СРЕДНЕШИРОТНАЯ АТМОСФЕРА ЕВРОПЕЙСКО-АЗИАТСКОГО РЕГИОНА В ПЕРИОД ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

THE MID-LATITUDE ATMOSPHERE OF THE EUROPEAN-ASIAN REGION DURING FORBUSH DECREASES IN COSMIC RAYS

В.Л. Янчуковский 

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru*

В.С. Кузьменко

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, KuzmenkoVS@ipgg.sbras.ru*

Р.З. Хисамов

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики
им. А.А. Трофимука СО РАН,
Новосибирск, Россия, KhisamovRZ@ipgg.sbras.ru*

V.L. Yanchukovsky

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology
and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia, YanchukovskiyVL@ipgg.sbras.ru*

V.S. Kuzmenko

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology
and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia, KuzmenkoVS@ipgg.sbras.ru*

R.Z. Khisamov

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology
and Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russia, KhisamovRZ@ipgg.sbras.ru*

Аннотация. Выполнен анализ реакции среднеширотной атмосферы на форбуш-понижения галактических космических лучей, для чего были привлечены результаты многолетних наблюдений вариаций космических лучей и изменений атмосферных параметров на семи среднеширотных станциях космических лучей за период с 1966 по 2024 г. Во время форбуш-понижений (на спаде и в минимуме интенсивности) наблюдается увеличение атмосферного давления на всех среднеширотных станциях космических лучей. При восстановлении интенсивности космических лучей после форбуш-понижения происходит уменьшение давления. Продолжительность этого отклика атмосферы совпадает с продолжительностью форбуш-понижения. Эффект более четко проявляется в холодный период года, а также для станций космических лучей с небольшими значениями жесткости геомагнитного обрезания. Вариации среднемассовой и приземной температур во время форбуш-понижения наблюдаются на всех станциях космических лучей и существенно различаются для холодного и теплого времени года. Полученные результаты позволяют предположить, что изменения облачности и прозрачности атмосферы, вызванные изменениями скорости ионизации во время форбуш-понижений, являются причиной наблюдаемых эффектов.

Ключевые слова: космические лучи, атмосфера, форбуш-понижения, давление, температура.

Abstract. The response of the mid-latitude atmosphere to Forbush decreases in galactic cosmic rays is analyzed. We use the results of long-term observations of cosmic ray variations and changes in atmospheric parameters at seven mid-latitude cosmic ray stations for the period from 1966 to 2024. During Forbush decreases (at the decline and minimum of intensity), an increase in atmospheric pressure is observed at all mid-latitude cosmic ray stations. When the cosmic ray intensity is restored after a Forbush decrease, the pressure decreases. The duration of this atmospheric response coincides with the duration of the Forbush decrease. The effect is more pronounced in the cold season, as well as for cosmic ray stations with small geomagnetic cutoff rigidity values. Variations in mean mass and surface temperatures during a Forbush decrease are observed at all cosmic ray stations and differ significantly for the cold and warm seasons. The obtained results suggest that changes in cloudiness and atmospheric transparency caused by changes in the ionization rate during Forbush decreases are a possible cause of the observed effects.

Keywords: cosmic rays, atmosphere, Forbush decreases, pressure, temperature.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы появилось значительное число работ, в которых рассматривается влияние солнечной активности и вызванных ею возмущений межпланетной среды на состояние нижней атмосферы. Имеются и работы, как, например, [Erlykin et al., 2009, 2011], где это влияние ставится под сомнение.

Одна из причин такой неоднозначности выводов, возможно, состоит в участии не одного, а многих факторов, одновременно воздействующих на атмосферу и отражающих изменения солнечной активности. В настоящее время все большее внимание привлекают космические лучи (КЛ), которые рассматриваются в качестве главного источника ионизации атмосферы на высотах от 3 до 50 км. Иссле-

дования последних лет свидетельствуют о существовании заметного отклика на вариации КЛ параметров атмосферы, таких как облачность [Pudovkin, Veretenenko, 1995], осадки [Kniveton, 2004], температура тропосферы [Pudovkin et al., 1996, 1997], прозрачность [Roldugin, Tinsley, 2004; Кудрявцев, Юнгер, 2011] и др. Было показано [Dickinson, 1975; Kondratyev, Nikolsky, 1983; Пудовкин, Распопов, 1992, 1993], что наблюдаемые изменения облачности и прозрачности атмосферы происходят за счет изменений интенсивности КЛ, определяющих скорость ионизации в нижней атмосфере. На основании перечисленных выше работ можно предположить, что ионизация атмосферы КЛ является одним из звеньев солнечно-атмосферных связей, а потому исследования эффектов КЛ в поведении параметров нижней атмосферы особенно актуальны. Непрерывные изменения во времени потока КЛ, вызванные его модуляцией в гелиосфере, будут регулировать вклад частиц космических лучей в ионизацию нижней атмосферы при изменениях солнечной активности. Для высоких широт связь эволюции и динамики барических систем с вариациями КЛ рассматривалась в работах [Веретененко, Тайл, 2008; Веретененко, Огурцов, 2012], для чего были привлечены данные станций Северо-Атлантического региона: Tasiilag (65.5° N, 38° W) на юго-восточном побережье Гренландии, Thorshavn (62° N, 6.5° W) на Фарерских о-вах и Jagersborg (56° N, 12° E) в Дании. В этих работах особо рассматривалось пространственное распределение атмосферного отклика на форбуш-понижения (ФП) КЛ и солнечные протонные события. На высоких широтах в связи с низкими порогами геомагнитного обрезания наблюдаются большие амплитуды вариаций КЛ. Это приводит к тому, что эффекты КЛ в эволюции барических систем на высоких широтах проявляются более масштабно [Веретененко, Тайл, 2008; Веретененко, Огурцов, 2012]. Исходя из этого, следует ожидать, что отклик атмосферы (изменения давления, температуры, состояния облачности и др.) на изменения солнечной активности может меняться от региона к региону. В работе [Янчуковский, 2024] выполнен анализ многолетних наблюдений вариаций КЛ и изменений атмосферных параметров на средних широтах в регионе Западной Сибири (Новосибирск). Возникает вопрос, является ли полученный результат [Янчуковский, 2024] характерным для средних широт вообще. Чтобы получить ответ на этот вопрос, были рассмотрены данные наблюдений семи среднеширотных станций КЛ за длительный период.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

К средним принято относить широты в интервале от тропика (23°26'22") до полярного круга (66°33'39") соответствующего полушария. Анализировались данные работающих в настоящее время станций КЛ, которые расположены в этом интервале широт. Перечень станций КЛ и их основные характеристики представлены в табл. 1.

В столбце таблицы «Жесткость геомагнитного обрезания» в скобках указана эпоха, которой соот-

ветствует приведенное значение. Исходя из пороговой жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО), станцию КЛ «Оулу» следует относить к высокоширотным станциям, но она включена в группу среднеширотных согласно ее географическим координатам, чтобы иметь возможность проследить широтный эффект.

Рассматривался временной интервал с 1966 по 2024 г. На этом интервале отбирались события с форбуш-понижениями галактических космических лучей с амплитудой $\geq 2.5\%$. При этом соблюдалось условие, чтобы на интервале ± 10 сут относительно начала ФП не наблюдалось другого ФП или солнечного протонного события. Таким образом было отобрано 141 событие. Каждой станцией КЛ было зарегистрировано разное число событий, поскольку наблюдения с помощью нейтронных мониторов на станциях были начаты в разное время. Для станции КЛ «Иркутск» в базе данных нет данных о давлении до 1989 г., а для станции КЛ «Якутск» нет данных о давлении и темпе счета нейтронного монитора до 1999 г. Исходные данные представляют собой темп счета нейтронных мониторов и значения одновременно измеренного атмосферного давления. Использовались часовые и среднесуточные значения. В табл. 2 указаны для каждой станции КЛ интервалы наблюдений, число зарегистрированных событий, тип инструмента и приведены ссылки на базы данных, откуда брались сведения.

При рассмотрении изменений температуры атмосферы в качестве источника часовых данных аэрологического зондирования атмосферы используется база данных <http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin>. Она включает данные Национального центра экологического прогнозирования США NCEP <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>. Анализ данных для обнаружения реакции атмосферы на ФП КЛ, как и ранее в работе [Янчуковский, 2024], осуществлялся с использованием метода наложенных эпох. Начало спада интенсивности КЛ в форбуш-понижении принималось за нулевой момент, относительно которого находились вариации интен-

сивности КЛ $\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \cdot 100\%$, регистрируемых

нейтронным монитором, и изменения атмосферного давления $\Delta h = h - h_0$. Здесь I_0 и h_0 — темп счета нейтронного монитора и значение атмосферного давления в нулевой момент соответственно.

Результаты, полученные таким образом для каждой станции КЛ, показаны на рис. 1 и 2 для событий в холодное (см. рис. 1, а и 2, а) и теплое (см. рис. 1, б и 2, б) время года. За холодный период года принимался интервал с октября по март, а за теплый период — с апреля по сентябрь.

Измерения изменений интенсивности осуществлялись с помощью стандартного прибора мировой сети станций КЛ — нейтронного монитора, который состоит из нескольких идентичных секций, каждая площадью 6 м². Мониторы на станциях КЛ имеют разное число секций (см. табл. 2), что приводит к неодинаковой точности измерения вариаций интенсив-

Таблица 1

Основные характеристики станций КЛ и ссылки на базы данных

№	Станция КЛ	Координаты	Высота, м	Жесткость геомагнитного обрезания, ГВ	Интернет-ресурс
1	Афины, Греция	37.58° N 23.47° E	260	8.348 (2022 г.)	https://www.nmdb.eu/station/athn/ https://tools.izmiran.ru/cutoff/
2	Иркутск, Россия	52.1° N 104.00° E	475	3.126 (2022 г.)	https://www.nmdb.eu/station/irkt/ https://tools.izmiran.ru/cutoff/
3	Киль, Германия	54.34° N 10.12° E	54	2.252 (2022 г.)	https://www.nmdb.eu/station/kiel/ https://tools.izmiran.ru/cutoff/
4	Москва, Россия	55.47° N 37.32° E	200	2.1 (2022 г.)	http://cr0.izmiran.ru/mosc/ https://www.nmdb.eu/station/mosc/ https://tools.izmiran.ru/cutoff/
5	Новосибирск, Россия	54.84° N 83.00° E	163	2.31 (2022 г.)	https://www.nmdb.eu/station/nvbk/ https://tools.izmiran.ru/cutoff/
6	Оулу, Финляндия	65.05° N 25.47° E	15	0.718 (2022 г.)	https://www.nmdb.eu/station/oulu/ https://tools.izmiran.ru/cutoff/
7	Якутск, Россия	62.02° N 129.72° E	105	1.356 (2022 г.)	https://www.nmdb.eu/station/yktk/ https://tools.izmiran.ru/cutoff/

Таблица 2

Интервалы наблюдений, число зарегистрированных событий, тип инструмента и ссылки на базы данных

№	Станция КЛ	Период наблюдений	Число событий	Инструмент	Интернет-ресурс
1	Афины, Греция	2003–2024	40	6-NM-64	https://www.nmdb.eu/nest/
2	Иркутск, Россия	1989–2024	87	18-NM-64	http://cgm.iszf.irk.ru https://www.nmdb.eu/nest/
3	Киль, Германия	2011–2024	24	18-NM-64	https://www.nmdb.eu/nest/
4	Москва, Россия	1966–2024	111	24-NM-64	http://cr0.izmiran.ru/mosc/
5	Новосибирск, Россия	1968–2024	134	24-NM-64	http://cr0.izmiran.ru/nvbk/main.htm http://193.232.24.200/nvbk/main.htm https://cosm-rays.ipgg.sbras.ru/data-page/
6	Оулу, Финляндия	1967–2024	128	9-NM-64	https://www.nmdb.eu/nest/ http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/esa-neutron-monitor-service/multi-station-neutron-monitor-data
7	Якутск, Россия	1999–2024	76	24-NM-64	https://ikfia.ysn.ru/data/hecr/nm/yak

ности КЛ. Например, для ст. «Афины», где работает одна секция монитора, темп счета составляет около 3500 имп/мин, а погрешность измерения вариаций по часовым данным составляет 0.22 %. Для ст. «Москва», где работают четыре секции монитора, темп счета равен 8600 имп/мин, а погрешность часовых данных не превышает 0.14 %. В работе используются среднесуточные значения, поэтому погрешность измерения вариаций интенсивности для Афин и Москвы уменьшится до 0.045 и 0.0285 % соответственно. Форбуш-понижение составляет порядка нескольких процентов (см. рис. 1 и 2). Это позволяет использовать данные всех станций КЛ, включая станции с одной секцией монитора. Измерения давления на станциях КЛ на всем временном интервале проводились различными приборами: ленточными барографами М-22 с калибровкой дважды в сутки [<https://www.анероид.рф/catalog/meteorologiya/registratoru/m-22a.htm>], цифровыми барографами ЦБ-1.2 разработки ИСЗФ СО РАН [Yanchukovsky et al., 1972], сетевым барометром БРС-1М-1 [<https://p-barometr.ru/>

brs-1m]. Погрешность измерений с помощью барографа М-22 составляла около 1 мб. Опытные образцы барографа ЦБ-1 [<https://patents.google.com/patent/SU504406A1/ru>] успешно использовались длительное время на станциях КЛ «Иркутск», «Новосибирск», «Москва» и обеспечивали точность измерения давления 0.1 мб (10 Па). В настоящее время на всех станциях применяется сертифицированный барометр БРС-1М с заводской поверкой (точность измерения давления 33 Па). В результате для всего периода наблюдений систематическая погрешность измерения давления не превышала 1 мб.

Стандартная ошибка среднего значения параметров ΔI и Δh определяется как $\pm \sigma / \sqrt{n}$ и зависит не только от числа слагаемых n . При регистрации большего числа ФП увеличивается временной интервал наблюдений, в результате возрастает диапазон изменений атмосферного давления, на фоне которого наблюдается эффект от ФП. Это вызывает увеличение стандартного отклонения σ , а потому не наблюдается резкого уменьшения

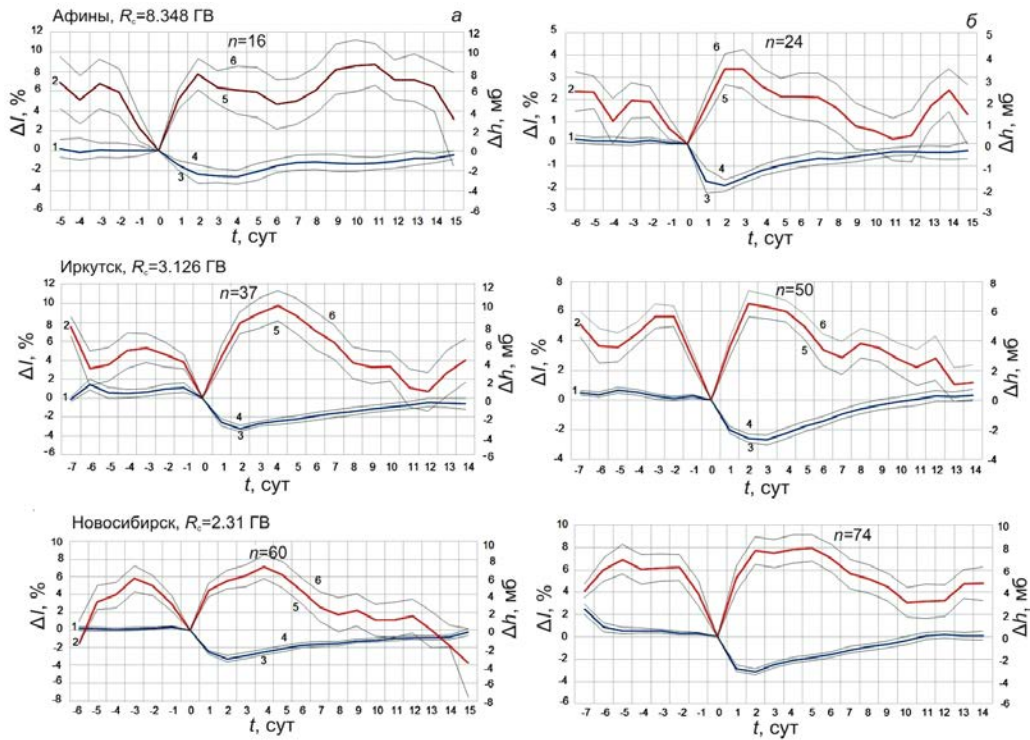


Рис. 1. Вариации интенсивности КЛ ΔI (кривая 1) и изменения атмосферного давления Δh (кривая 2) для холодного (а) и теплого (б) времени года, наблюдаемые на станциях КЛ с пороговыми жесткостями от 8.348 до 2.31 ГВ. Кривые 3, 4 и 5, 6 показывают стандартные ошибки среднего для ΔI и Δh соответственно

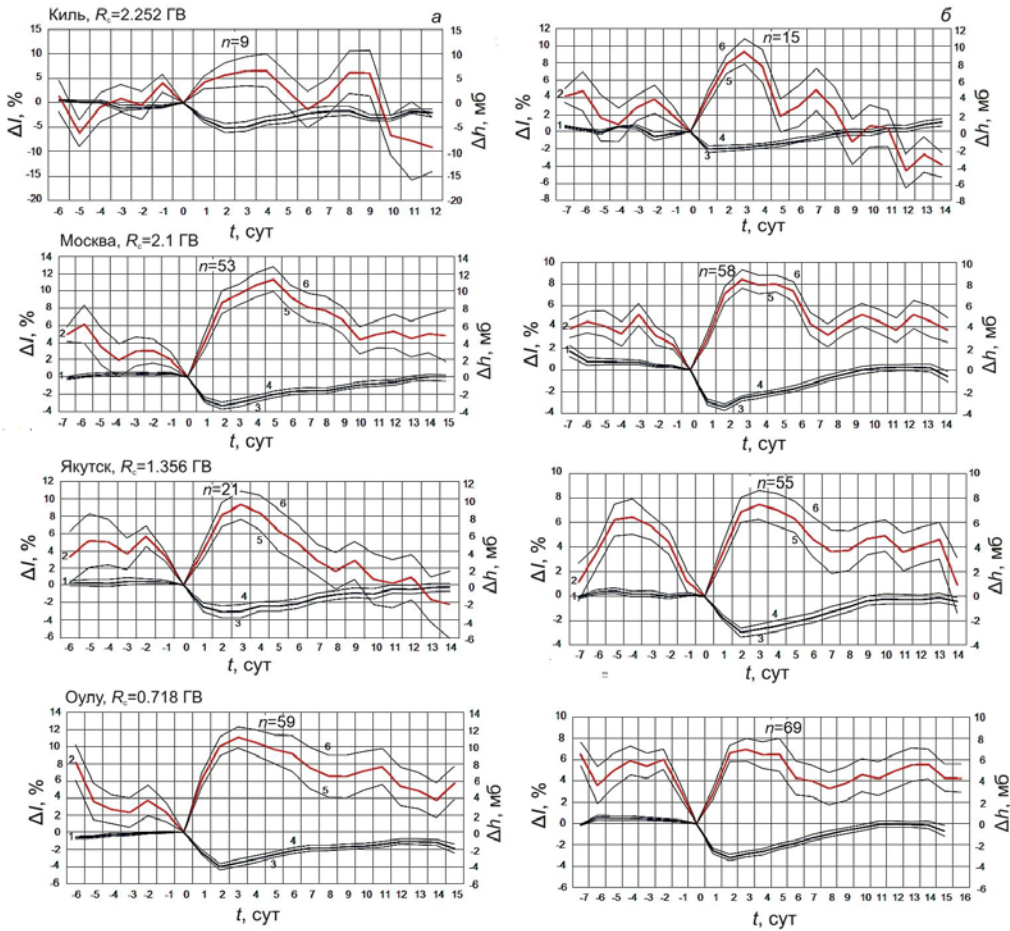


Рис. 2. Вариации интенсивности КЛ ΔI (кривая 1) и изменения атмосферного давления Δh (кривая 2) для холодного (а) и теплого (б) времени года, наблюдаемые на станциях КЛ с пороговыми жесткостями от 2.252 до 0.718 ГВ. Кривые 3, 4 и 5, 6 показывают стандартные ошибки среднего для ΔI и Δh соответственно

ошибки при значительном увеличении числа зарегистрированных ФП.

Результаты, полученные на станциях КЛ, на рис. 1 и 2 представлены в порядке уменьшения жесткости геомагнитного обрезания (от низких широт к высоким). При спаде и в минимуме интенсивности КЛ в период ФП наблюдается увеличение атмосферного давления (относительно нулевых суток) на всех среднеширотных станциях в любое время года. При восстановлении интенсивности КЛ после ФП происходит уменьшение давления. Продолжительность этого отклика атмосферы совпадает с продолжительностью ФП КЛ. Следует отметить, что эффект более выражен в холодный период года, а также для станций КЛ с небольшими значениями жесткости геомагнитного обрезания. Атмосферное давление возрастает до максимальных значений на 3–5 сут. Для станций КЛ с небольшими значениями жесткости геомагнитного обрезания давление часто достигает максимальных значений уже на третьи сутки. Вариации интенсивности КЛ и изменения атмосферного давления в период ФП, усредненные по всем среднеширотным станциям КЛ и всем событиям, представлены на рис. 3.

Усреднение по всем станциям КЛ выполнено с учетом статистического веса станции, т. е. с учетом доли событий, зарегистрированных на каждой станции, в общем числе событий. Результаты на практике считаются достоверными, если уровень статистической значимости результатов составляет ≤ 0.05 , что соответствует доверительному интервалу $\pm 3\sigma$. Среднеквадратичные отклонения $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2}$

находились, как и ранее в работе [Янчуковский, 2024], для каждой точки полученных распределений независимо. Наблюдается разброс полученных значений σ : для событий в холодное время года в пределах 0.144–0.5 при среднем значении 0.378, для событий в теплое время года в пределах 0.135–0.3 при среднем значении 0.233, для всех событий в пределах 0.139–0.35 при среднем значении 0.279. Перед ФП наблюдается уменьшение атмосферного давления. Такое поведение давления, т. е. его понижение перед фронтом ФП, наблюдалось и ранее [Tinsley et al., 1989]. Было высказано предположение, что это следует рассматривать как отдельный эффект собственно солнечной вспышки, результатом которой является ФП КЛ (так называемые ранний и поздний эффекты вспышки) [Tinsley et al., 1989].

Возрастание атмосферного давления во время ФП в основном наблюдается в первые трое суток, когда происходит резкий спад интенсивности КЛ. Максимальных значений изменения давления Δh достигают на четвертые-пятые сутки, затем Δh уменьшается на фазе восстановления интенсивности КЛ после ФП. Перепад давления в среднем составляет 8 мб. Таким образом, эффект более четко проявляется в холодное время года. Ранее в работах [Мустель, 1974; Tinsley, Deen, 1991; Veretenenko, Thejll, 2013] указывалось, что реакция атмосферы на изменения солнечной активности в умеренных

широтах Северного полушария более выражена в холодный период года, когда происходит интенсификация циклонических процессов, вызванная усилением температурных контрастов в тропосфере.

С привлечением метода наложенных эпох рассмотрено поведение температуры атмосферы на средних широтах в период ФП КЛ. Высотный профиль температуры атмосферы был получен на основе аэрологических данных с часовым разрешением из баз [<http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin>, <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>], где, к сожалению, имеются данные только за период с 2000 по 2018 г. для четырех пунктов наблюдений КЛ: Киль, Москва, Новосибирск, Якутск. В качестве характеристик температурного режима атмосферы использовались среднемассовая температура атмосферы $T_{cm} = \sum_{i=1}^n T_i \Delta h_i / \sum_{i=1}^n \Delta h_i$, где T_i — температура слоя (изобары) i атмосферы, а Δh_i — масса этого слоя, а также приземная температура $T_{пр}$ (температура приземного слоя переменной массы ($h=950$) мб). Общее число ФП, зарегистрированных за указанный период четырьмя станциями КЛ, составило 112, из них станцией «Киль» — 20, «Москва» — 29, «Новосибирск» — 35, «Якутск» — 30. Вариации среднемассовой ΔT_{cm} и приземной $\Delta T_{пр}$ температур во время ФП КЛ для этих пунктов наблюдений показаны на рис. 4.

Вариации среднемассовой и приземной температур, наблюдаемые на всех станциях КЛ, имеют существенные различия в холодное и теплое время года. Вариации температуры атмосферы более четко проявляются в холодное время. При спаде интенсивности КЛ во время ФП наблюдается увеличение среднемассовой и приземной температуры, а на фазе восстановления интенсивности КЛ в ФП, наоборот, наблюдается уменьшение температур атмосферы. Вариации интенсивности КЛ и изменения среднемассовой и приземной температур атмосферы во время ФП КЛ, усредненные по четырем среднеширотным станциям КЛ и всем событиям, представлены на рис. 5.

Как и ранее, усреднение по всем станциям КЛ выполнено с учетом статистического веса станции. Отклонения σ для среднемассовой температуры ΔT_{cm} (для холодного периода) находятся в пределах 0.078–0.31 при среднем значении 0.214, а для приземной температуры $\Delta T_{пр}$ — в пределах 0.108–0.42 при среднем значении 0.306.

При спаде интенсивности КЛ во время ФП происходит возрастание атмосферного давления, среднемассовой и приземной температур, которые достигают наибольших значений при минимальной интенсивности КЛ (в районе минимума ФП), а затем происходит уменьшение этих параметров с увеличением интенсивности КЛ (на фазе восстановления ФП). В холодное время наблюдается увеличение среднемассовой температуры атмосферы в среднем на один градус: $\Delta T_{cm} = +1.11$ °С. Увеличение приземной температуры почти вдвое больше: $\Delta T_{пр} = +1.86$ °С.

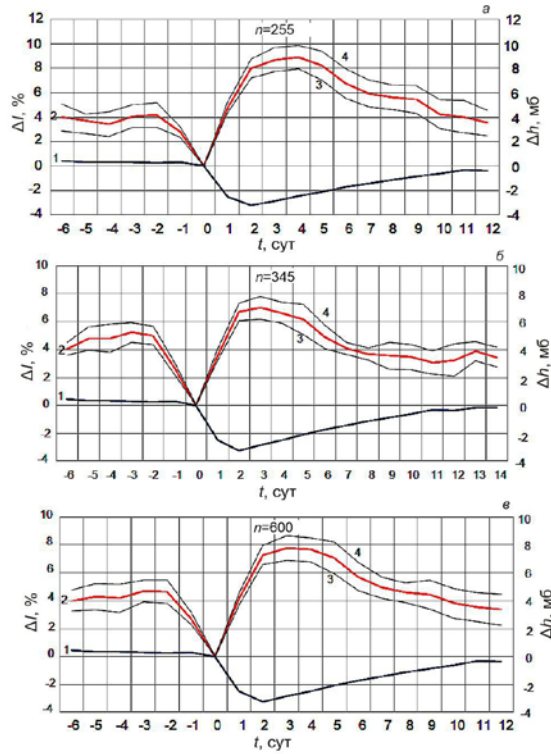


Рис. 3. Вариации интенсивности КЛ ΔI (кривая 1) и изменения атмосферного давления Δh (кривая 2) в период ФП на средних широтах для событий в холодное (а) и теплое (б) время года и для всех событий (е). Кривыми 3 и 4 показаны границы доверительного интервала $\pm 3\sigma$

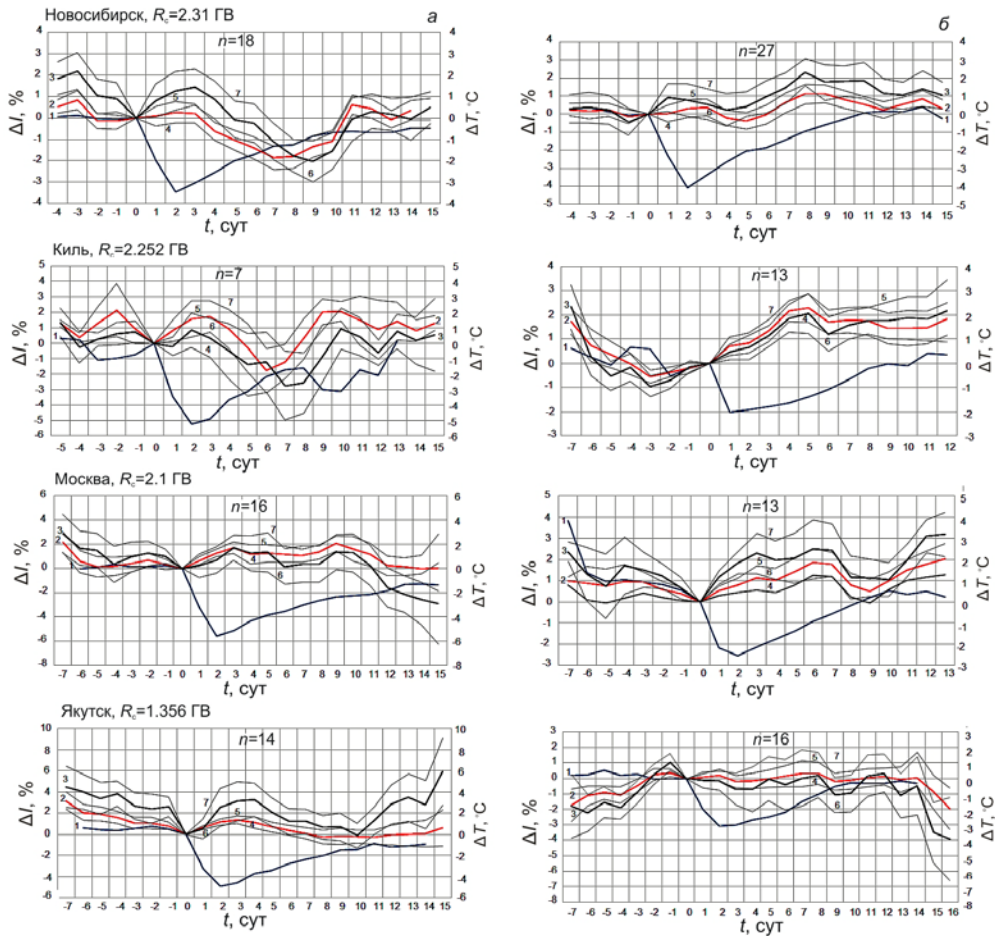


Рис. 4. Вариации интенсивности КЛ ΔI (кривая 1) и изменения ΔT среднемассовой (кривая 2) и приземной (кривая 3) температуры атмосферы в течение ФП КЛ, наблюдаемые на четырех среднеширотных станциях КЛ в холодное (а) и теплое (б) время года. Кривые 4, 5 и 6, 7 показывают стандартные ошибки среднего для ΔT_{cm} и ΔT_{pr} соответственно

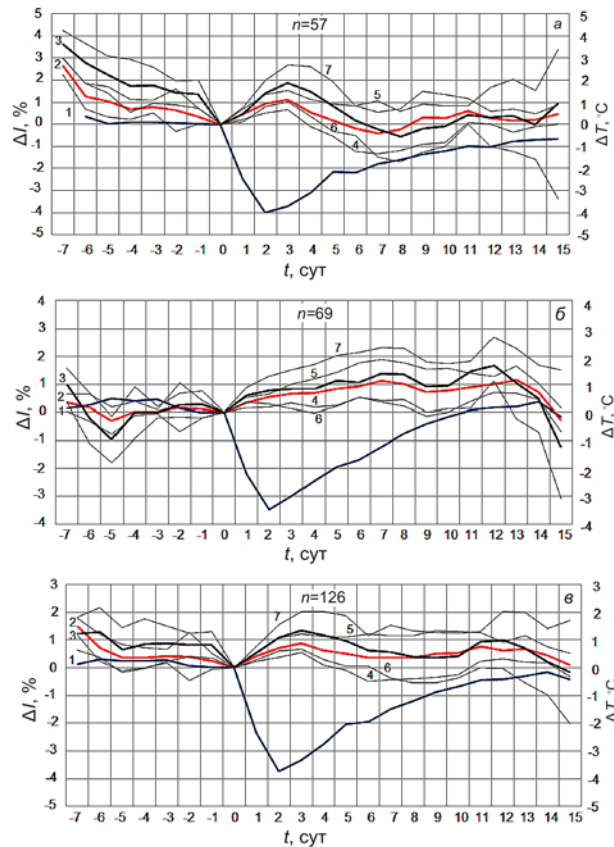


Рис. 5. Вариации интенсивности КЛ ΔI (кривая 1) и изменения ΔT среднемассовой (кривая 2) и приземной (кривая 3) температуры атмосферы в течение ФП КЛ для событий в холодное (а) и теплое (б) время года и для всех событий (в). Кривыми 4, 5, 6, 7 показаны границы доверительного интервала $\pm 3\sigma$ для $\Delta T_{см}$ и $\Delta T_{пр}$ соответственно

Для ФП КЛ характерны значительные вариации интенсивности КЛ (крутой спад и постепенное восстановление), которые вызывают резкие изменения скорости ионизации атмосферы и, как следствие, изменения химического и аэрозольного состава атмосферы, что приводит к изменениям прозрачности атмосферы и состояния ее облачного покрова [Пудовкин, Распопов, 1993]. Отмечается [Shumilov et al., 1996], что это происходит без значительной временной задержки.

Полученные результаты позволяют предположить, что изменения облачности и прозрачности атмосферы, вызванные изменениями скорости ионизации во время ФП КЛ, являются причиной наблюдаемых эффектов. Уменьшение облачного покрова в ходе ФП КЛ в области умеренных и высоких широт было обнаружено в ряде работ [Веретенко, Пудовкин, 1994, 1996; Todd, Kniveton, 2001, 2004]. Изменения облачности и прозрачности атмосферы регулируют количество как поступающей коротковолновой солнечной радиации к поверхности Земли, так и излучаемой земной поверхностью длинноволновой радиации. Суммарный эффект в этом случае будет определяться широтой, временем года и типом земной поверхности (материк, океан) [Матвеев, 1991].

Исследование воздействия солнечной активности на температуру тропосферы с использованием индексов геомагнитной активности в качестве индикатора солнечной активности выполнено в работе [Караханян, Молодых, 2018]. ФП КЛ часто протекают

на фоне геомагнитных возмущений, но не всегда. Некоторая часть ФП не сопровождается геомагнитными бурями, а часть геомагнитных возмущений проходит без ФП. Это в дальнейшем может дать возможность классифицировать все события по этому признаку, разбив их на три категории и рассмотрев независимо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время ФП КЛ (на спаде и в минимуме интенсивности КЛ) наблюдается увеличение атмосферного давления на всех среднеширотных станциях КЛ. При восстановлении интенсивности КЛ после ФП происходит уменьшение давления. Продолжительность этого отклика атмосферы совпадает с продолжительностью ФП КЛ. Следует отметить, что эффект более выражен в холодный период года, а также для станций КЛ с небольшими значениями жесткости геомагнитного обреза. Возрастание атмосферного давления в основном наблюдается в первые трое суток, когда происходит резкий спад интенсивности КЛ. Максимальных значений изменения давления Δh достигают на четвертые-пятые сутки. Для станций КЛ с небольшими значениями жесткости геомагнитного обреза давление часто достигает максимальных значений уже на третьи сутки. Перепад давления Δh для умеренных широт в среднем составляет 8 мб.

Вариации среднемассовой и приземной температур во время ФП КЛ наблюдаются на всех станциях КЛ и существенно различаются для холодного и теп-

лого времени года. При спаде интенсивности КЛ во время ФП происходит возрастание атмосферного давления, среднемассовой и приземной температур, которые достигают наибольших значений при минимальной интенсивности КЛ (в районе минимума ФП), а затем происходит уменьшение этих параметров с увеличением интенсивности КЛ (на фазе восстановления ФП).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проект FWZZ-2022-0019). Результаты получены с использованием оборудования УНУ-85 «Российская национальная сеть станций космических лучей» [<http://www.ckp-rf.ru/usu/433536>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты форбуш-понижений галактических космических лучей в вариациях общей облачности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1994, т. 34, с. 38–44.
- Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Вариации общей облачности в ходе всплесков солнечных космических лучей. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1996, т. 36, № 1, с. 153–156.
- Веретененко С.В., Тайл П. Солнечные протонные события и эволюция циклонов в Северной Атлантике. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008, т. 48, № 4, с. 542–552.
- Веретененко С.В., Огурцов М.Г. Исследование пространственно-временной структуры долгопериодных эффектов солнечной активности и вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2012, т. 52, № 5, с. 626–638.
- Караханян А.А., Молодых С.И. Пространственное распределение температуры во время геомагнитных возмущений. *Солнечно-земная физика*. 2018, т. 4, № 4, с. 76–81. <https://doi.org/10.12737/szf-44201808> / Karakhanyan A.A., Molodykh S.I. Spatial distribution of temperature during geomagnetic disturbances. *Sol.-Terr. Phys.* 2018, vol. 4, iss. 4, pp. 59–62. <https://doi.org/10.12737/stp-44201808>.
- Кудрявцев И.В., Юнгер Х. Вариации прозрачности атмосферы под действием галактических космических лучей как возможная причина их влияния на формирование облачности. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2011, т. 51, № 5, с. 668–676. <https://doi.org/10.1134/S0016793211050100>.
- Матвеев Л.Т. *Теория общей циркуляции атмосферы и климата Земли*. Л.: Гидрометеиздат, 1991, 296 с.
- Мустель Э.Р. Современное состояние вопроса о реальности корпускулярно-атмосферных связей. *Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды*. Л.: Гидрометеиздат, 1974, с. 7–18.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Механизм воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и метеопараметры (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 1992, т. 32, с. 1–22.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы, метеопараметры и климат. *Успехи физических наук*. 1993, т. 163, № 7, с. 113–116. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0163.199307i.0113>.
- Янчуковский В.Л. Реакция среднеширотной атмосферы на спорадические вариации космических лучей в регионе Западной Сибири. *Солнечно-земная физика*. 2024, т. 10, № 4, с. 65–71. <https://doi.org/10.12737/szf-104202407> / Yanchukovsky V.L. Response of the mid-latitude atmosphere to sporadic cosmic ray variations in the Western Siberian region. *Solar-Terr. Phys.* 2024, vol. 10, iss. 4, pp. 59–64. <https://doi.org/10.12737/stp-104202407>.
- Dickinson R.E. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1975, vol. 56, iss. 12, pp. 1240–1248. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1975\)056<1240:SVATLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1975)056<1240:SVATLA>2.0.CO;2).
- Erlykin A.D., Wolfendale A.W. Cosmic ray effects on cloud cover and their relevance to climate change. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011, vol. 77, pp. 1681–1686. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.001>.
- Erlykin A.D., Gualai G., Kudela K., et al. Some aspects of ionization and the cloud cover, cosmic ray correlation problem. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2009, vol. 71, pp. 823–829. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.03.007>.
- Kniveton D.R. Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 2004, vol. 66, iss. 13-14, pp. 1135–1142. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.010>.
- Kondratyev K.Ya., Nikolsky G.A. The solar constant and climate. *Solar Phys.* 1983, vol. 89, pp. 215–222. <https://doi.org/10.1007/BF00211964>.
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V. Cloudiness decreases associated with Forbush-decreases of galactic cosmic rays. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 1995, vol. 57, iss. 11, pp. 1349–1355. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(94\)00109-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)00109-2).
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R., Kyro E. Cosmic ray variation effects in the temperature of the high-latitude atmosphere. *Adv. Space Res.* 1996, vol. 17, iss. 11, pp. 165–168. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00746-2](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00746-2).
- Roldugin V.C., Tinsley B.A. Atmospheric transparency changes associated with solar wind-induced atmospheric electricity variations. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004, vol. 66, iss. 13-14, pp. 1143–1149. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.006>.
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V., Pellinen R., Kyro E. Meteorological characteristic changes in the high-latitude atmosphere associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays. *Adv. Space Res.* 1997, vol. 20, iss. 6, pp. 1169–1172. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00767-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00767-9).
- Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Henriksen K., Vashenok E. Enhancement of stratospheric aerosol after solar proton event. *Ann. Geophys.* 1996, vol. 4, iss. 11, pp. 1119–1123. <https://doi.org/10.1007/s00585-996-1119-y>.
- 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? *J. Geophys. Res.* 1991, vol. 96, pp. 22283–22296. <https://doi.org/10.1029/91JD02473>.
- Tinsley B.A., Brown G.M., Scherrer P.H. Solar variability influences on weather and climate: Possible connections through cosmic ray fluxes and storm intensification. *J. Geophys. Res.* 1989, vol. 94, iss. D12, pp. 14783–14792. <https://doi.org/10.1029/JD094iD12p14783>.
- Todd M.C., Kniveton D.R. Changes in cloud cover associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays. *J. Geophys. Res.* 2001, vol. 106, pp. 32031–32041. <https://doi.org/10.1029/2001JD000405>.
- Todd M.C., Kniveton D.R. Short term variability in satellite-derived cloud cover and galactic cosmic rays: an update. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004, vol. 66, pp. 1205–1212. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.002>.
- Veretenenko S., Thejll P. Influence of energetic solar proton events on the development of cyclonic processes at extratropical latitudes. *IOP Publishing. J. Phys.: Conf. Ser.* 2013, vol. 409, 012237. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012237>.
- Yanchukovsky A.L., Tergoev V.I., Shapovalova P.A. Digital barograph. Patent SU504406A1. 1972.
URL: <http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin> (дата обращения 17 сентября 2025 г.).
- URL: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs> (дата обращения 17 сентября 2025 г.).
- URL: <https://www.nmdb.eu/station/athn/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).

URL: <https://www.nmdb.eu/station/irkt/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <https://www.nmdb.eu/station/kiel/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <http://cr0.izmiran.ru/mosc/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <https://www.nmdb.eu/station/mosc/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <https://www.nmdb.eu/station/nvbk/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <https://www.nmdb.eu/station/oulu/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <https://www.nmdb.eu/station/ytkk/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <https://www.nmdb.eu/nest/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <http://cgm.iszf.irk.ru> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <http://cr0.izmiran.ru/nvbk/main.htm> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <http://193.232.24.200/nvbk/main.htm> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <https://cosm-rays.ipgg.sbras.ru/data-page/> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <http://cosray.phys.uoa.gr/index.php/esa-neutron-monitor-service/multi-station-neutron-monitor-data> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).

URL: <https://ikfia.ysn.ru/data/hecr/nm/yak> (дата обращения 18 сентября 2025 г.).
URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 25 октября 2025 г.).
URL: <https://tools.izmiran.ru/cutoff/> (дата обращения 25 октября 2025 г.).
URL: <https://p-barometr.ru/brs-1m> (дата обращения 25 октября 2025 г.).
URL: <https://patents.google.com/patent/SU504406A1/ru> (дата обращения 25 октября 2025 г.).
URL: <https://www.анероид.рф/catalog/meteorologiya/registratoriy/m-22a.htm> (дата обращения 25 октября 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Янчуковский В.Л., Кузьменко В.С., Хисамов Р.З. Среднеширотная атмосфера в период Форбуш-понижений космических лучей. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, №. 2, с. 54–62.
<https://doi.org/10.12737/szf-122202606>.