

РЕАКЦИЯ СРЕДНЕШИРОТНОЙ АТМОСФЕРЫ НА СПОРАДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В РЕГИОНЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

RESPONSE OF THE MID-LATITUDE ATMOSPHERE TO SPORADIC COSMIC RAY VARIATIONS IN THE WESTERN SIBERIAN REGION

В.Л. Янчуковский

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

V.L. Yanchukovsky

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

Аннотация. Представлены результаты многолетних наблюдений вариаций космических лучей и атмосферных параметров на средних широтах (район Новосибирска). Выполнен анализ отклика атмосферы на форбуш-понижения галактических космических лучей (КЛ) и солнечные протонные события. Для анализа привлечено 181 форбуш-понижение и 18 наземных возрастаний солнечных космических лучей (Ground Level Enhancement, GLE) за 1967–2019 гг. Это позволило рассматривать эффект в зависимости от сезона года. Эффект увеличения давления во время форбуш-понижения более выражен в осенне-зимний период, однако имеет место и в теплое время года. Для средних широт отмечается также тенденция к росту давления после GLE. На фронте форбуш-понижения при спаде интенсивности КЛ с ростом атмосферного давления наблюдается возрастание среднемассовой и приземной температуры. На фазе восстановления интенсивности после форбуш-понижения происходит уменьшение среднемассовой и приземной температуры. Предполагается, что наблюдаемые вариации атмосферных параметров обусловлены влиянием космических лучей на скорость ионизации, в свою очередь обуславливающую вариации прозрачности атмосферы и облачности.

Ключевые слова: космические лучи, солнечные протонные события, атмосфера, давление, температура.

Abstract. The article presents the results of long-term observations of cosmic ray variations and changes in atmospheric parameters at midlatitudes in the Novosibirsk Region. The atmospheric response to Forbush decreases in galactic cosmic rays (CR) and solar proton events is analyzed. The analysis involves 181 Forbush decreases and 18 GLEs (Ground Level Enhancement) for the period 1967–2019. This makes it possible to examine the effect depending on season. The effect of increasing pressure during the Forbush decrease in cosmic rays is more pronounced in the autumn-winter period. Nonetheless, it also occurs in the warm season. For midlatitudes, there is also a tendency for pressure to increase after GLE. At the Forbush decrease front, with a decrease in CR intensity and an increase in atmospheric pressure, an increase in the average mass and surface temperature is observed. In the intensity recovery phase after the Forbush decrease, a decrease in the average mass and surface temperature occurs. The observed variations in atmospheric parameters are assumed to be due to changes in the ionization rate under the influence of cosmic rays in variations in atmospheric transparency and cloudiness.

Keywords: cosmic rays, solar proton events, atmosphere, pressure, temperature.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий многие исследователи рассматривали влияние космических лучей (КЛ) на погоду и климат Земли. Одним из первых, кто предположил, что ионизация воздуха КЛ влияет на погоду и климат, был Ней [Neu, 1959]. Являясь основным источником ионизации в тропосфере, космические лучи вызывают значительные химические и физические изменения в атмосфере [Dorman, 2004; Harrison, Tammiet, 2008]. Ионы, возникшие в результате ионизации воздуха КЛ, провоцируют многие атмосферные процессы: образование облачности [Pudovkin, Veretenenko, 1995; Svensmark, 1998; Marsh, Svensmark, 2000; Pallé et al., 2004; Usoskin, Kovaltsov, 2006], осадков [Kniveton, 2004] и аэрозолей [Lee et al., 2003; Лушников и др., 2014], изменения прозрачности атмосферы [Roldugin, Tinsley, 2004; Кудрявцев,

Юнгер, 2011] и параметров глобальной электрической цепи [Ermakov, Stozhkov, 2004; Tinsley, Zhou, 2006], циклогенез на средних и высоких широтах [Veretenenko, Thejll, 2004; Tinsley, 2012]. Вклад КЛ в ионизацию атмосферы изменяется во времени в результате модуляции потока КЛ в гелиосфере. Это указывает, что ионизация тропосферы КЛ является одним из механизмов солнечно-атмосферных взаимодействий. Эффекты вариаций КЛ в эволюции барических систем, которые наблюдались в Североатлантическом регионе, были детально рассмотрены в работах [Веретененко, Тайл, 2008; Веретененко, Огурцов, 2012]. Были использованы данные станций на юго-восточном побережье Гренландии (Tasiilag, 65.5° N, 38° W), на Фарерских островах (Thorshavn, 62° N, 6.5° W) и в Дании (Jagersborg, 56° N, 12° E). Описание региона, перечень и характеристики стан-

Таблица 1

Параметры пункта наблюдений

широта φ	долгота λ	Геомагнитная широта (квазидипольная) Φ	Жесткость геомагнитного обрезания R_c	Высота над ур. м. H_0	Атмосферное давление h_0
54.84°	83.00°	51.59°	2.91 ГВ	163 м	995 мб

Таблица 2

Распределение числа форбуш-понижений

Временной интервал	Кол-во ФП с амплитудой			Всего ФП
	2.5÷4.5 %	5÷7 %	≥8 %	
осень (сентябрь–ноябрь)	24	10	11	45
зима (декабрь–февраль)	22	21	4	47
весна (март–май)	20	14	5	39
лето (июнь–август)	22	20	8	50
весь период	88	65	28	181

ций, данные которых рассматривались, подробно представлены в [Веретененко, 2017]. Для этих широт характерны низкие пороги геомагнитного обрезания, допускающие высыпание частиц с минимальными энергиями от ~100 МэВ. Уделено особое внимание исследованию пространственного распределения атмосферного отклика на форбуш-понижения (ФП) КЛ и солнечные протонные события (СПС). При подобных исследованиях следует учитывать пространственно-временную изменчивость солнечно-атмосферных связей. Изменения давления, температуры, облачности и др. как реакция атмосферы на те или иные проявления солнечной активности могут в значительной степени различаться в зависимости от исследуемого региона. Ниже представлены результаты многолетних наблюдений вариаций космических лучей и изменений атмосферных параметров на средних широтах (район Новосибирска).

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

Данные аэрологического зондирования атмосферы (за каждый час) над Новосибирском взяты из базы [<http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin>], которая содержит также результаты Национального центра экологического прогнозирования США (NCEP) [<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>]. Вариации КЛ получены по данным непрерывных наблюдений темпа счета нейтронного монитора 24NM-64 ст. «Новосибирск», [<http://193.232.24.200/nvbk/main.htm>], там же одновременно с наблюдениями КЛ осуществлялись измерения атмосферного давления. Использовались часовые и среднесуточные значения темпа счета нейтронного монитора и атмосферного давления. Основные параметры пункта наблюдений представлены в табл. 1.

Анализ отклика атмосферы на форбуш-понижения галактических космических лучей (ГКЛ), так же как и на солнечные протонные события, проводился методом наложенных эпох. Для исследования выбирались ФП с амплитудой не менее 2.5 % по данным нейтронного монитора ст. «Новосибирск», для ко-

торых на интервале ± 10 сут относительно нулевых суток рассматриваемого события не наблюдалось другого события (ФП или СПС). За 1967–2019 гг. было отобрано 181 ФП, из них не сопровождалось геомагнитными бурями 54 ФП: 44 события с амплитудой 2.5÷4.5 %, 7 событий — 5÷7 %, 3 события — ≥ 8 %. Распределение числа ФП в зависимости от сезона и их амплитуды представлено табл. 2.

В качестве нулевого отсчета принималось начало спада интенсивности КЛ в ФП. Относительно этого момента рассматривались изменения как атмосферного давления $\Delta h = h - h_0$, так и интенсивности КЛ

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \cdot 100 \%. \text{ Здесь } h, I \text{ — текущие значения}$$

параметров, h_0, I_0 — значения для нулевого момента времени. На рис. 1 показаны изменения давления в период ФП для различных сезонов года на средних широтах.

Для всех сезонов года наблюдается увеличение атмосферного давления в период ФП: на спаде, в минимуме и в начальной фазе восстановления интенсивности КЛ. Перед ФП происходит уменьшение атмосферного давления, при этом наименьшие значения отмечаются в нулевые сутки. В первые сутки после нулевых начинается рост давления, и на 4÷6 сут оно достигает максимальных значений. Для высоких широт максимум давления наблюдался на третьи сутки [Pudovkin et al., 1997]. При дальнейшем восстановлении интенсивности КЛ происходит спад давления (см. рис. 1). Длительность этого отклика атмосферы составляет в среднем около 12 сут и практически совпадает с продолжительностью ФП КЛ. В работах [Веретененко, Пудовкин, 1993; Pudovkin et al., 1997; Веретененко, Тайл, 2008] события отбирались только для холодного времени года (октябрь–март), а для теплого полугодия не рассматривались. В работах [Artamonova, Veretenenko, 2011, 2014] было проанализировано 48 ФП за 1980–2006 гг. В настоящей статье анализируется 181 ФП (см. табл. 2) за 1967–2019 гг., что позволяет рассматривать эффект в зависимости от сезона. С использованием метода наложенных эпох рассматривалось изменение

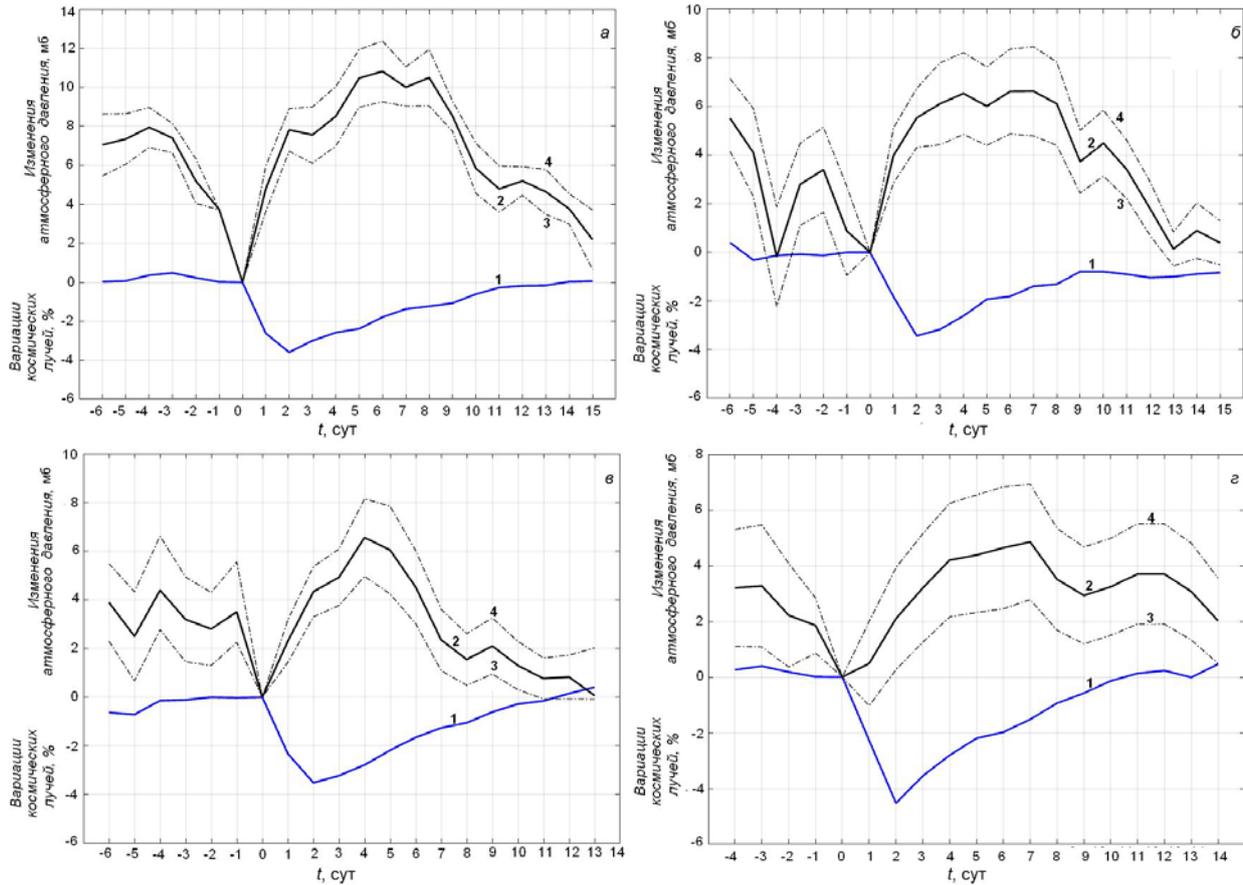


Рис. 1. Вариации интенсивности КЛ (кривая 1) и атмосферного давления (кривая 2) во время ФП, наблюдаемых осенью (а), зимой (б), весной (в) и летом (г). Кривыми 3 и 4 показаны границы доверительного интервала $\pm 3\sigma$

атмосферного давления Δh относительно давления в нулевой момент события. Оценки статистической значимости результатов приведены для уровня ≤ 0.05 . Это довольно жесткие условия, и на практике результаты при этом считаются достоверными. Уровень ≤ 0.05 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 для каждой точки

полученных распределений независимо. Имеется некоторый разброс значений σ для различных сезонов года: для осени — 0.253 ± 0.52 мб, для зимы — 0.29 ± 0.56 мб, для весны — 0.33 ± 0.6 мб, для лета — 0.506 ± 0.73 мб. Границы доверительных интервалов $\pm 3\sigma$ показаны на рис. 1 кривыми 3 и 4. Эффект увеличения давления лучше проявляется в осенне-зимний период (рис. 1, а, б). Глубина эффекта далеко не одинакова при одинаковой амплитуде спорадической вариации КЛ и в значительной степени зависит от состояния атмосферы в данный момент времени. Возможно, эффект имеет место и в теплое время года (рис. 1, в, г), поскольку невысокая статистическая значимость эффекта отнюдь не означает его отсутствия. Изменения интенсивности КЛ и атмосферного давления в период ФП, усредненные по 181 событию, представлены на рис. 2.

Атмосферное давление достигает максимума на 5 сут от начала ФП и составляет в среднем 6–7 мб

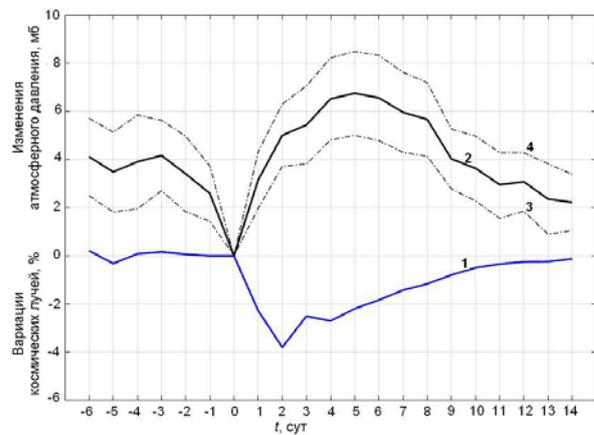


Рис. 2. Вариации интенсивности КЛ (кривая 1) и атмосферного давления (кривая 2) в период ФП, усредненные по 181 событию. Кривыми 3 и 4 показаны границы доверительного интервала $\pm 3\sigma$

относительно опорного значения. Перед событием в течение 2 сут происходит уменьшение атмосферного давления. Было высказано предположение [Tinsley et al., 1989], что это представляет собой отдельный эффект собственно солнечной вспышки, результатом которой и является последующее форбуш-понижение (так называемые «ранний» и «поздний» эффекты вспышки). Продолжительность наблюдаемого эффекта в изменении атмосферного давления определяется продолжительностью ФП (см. рис. 2).

Наряду с ФП к спорадическим явлениям в космических лучах относятся вспышки солнечных космических лучей (СКЛ), которые чаще называют солнечными протонными событиями (СПС). Энергия частиц в этих потоках обычно не велика (порядка сотен МэВ), и они не регистрируются у земной поверхности. Реакция атмосферы на такие СПС наблюдается в основном на высоких широтах [Веретененко, Тайл, 2008]. СПС, содержащие частицы с энергией 1 ГэВ и более, регистрируются как наземные возрастания солнечных космических лучей (Ground Level Enhancement, GLE) [<https://gle oulu.fi/>]. GLE — сравнительно редкие события, их доля не превышает 5 % всех СПС. В среднем регистрируется одно событие в год. Наблюдаемые во время GLE с помощью нейтронных мониторов вариации КЛ могут более чем на порядок превышать 11-летнюю вариацию КЛ и самые крупные форбуш-понижения. Реакция нейтронных мониторов в высоких и средних широтах на GLE не одинакова, что обусловлено жесткостью геомагнитного обрезания. В Новосибирске с помощью нейтронного монитора 24NM-64 за весь период наблюдений было зарегистрировано 18 GLE, значительно различающихся по интенсивности: 5 событий имели амплитуду 2.5–4.5 %, 5 — 4.6–5.5 %, 3 события — 5.6–9.5 %, 2 — 10–15 %, 2 — 20–30 % и одно событие — 127 %. События были сгруппированы для холодного (с ноября по март) и теплого (с апреля по октябрь) времен года, на каждый период пришлось 9 GLE. При рассмотрении реакции атмосферного давления на GLE методом наложенных эпох за нулевой принимался день, когда наблюдался максимум вспышки солнечных космических лучей. Результат показан на рис. 3.

Перед GLE наблюдается понижение атмосферного давления, а после вспышки — его возрастание с некоторым провалом на вторые сутки. Ранее в работе [Веретененко, Тайл, 2008] для СПС с потоками частиц с энергиями ≥ 90 МэВ отмечалось на высоких широтах уменьшение давления в первые сутки после нулевых в холодное время года (октябрь–март). Чтобы более детально проследить поведение атмосферного давления в нулевые и первые сутки, мы использовали исходные данные с часовым разрешением. За нулевой принимался час, соответствующий максимуму вспышки СКЛ. Вариации атмосферного давления с часовым разрешением показаны на рис. 4.

Некоторое уменьшение давления происходит в течение первых 12 ч после вспышки СКЛ, но в теплое время года. На интервале первых 1.5 сут характер вариаций атмосферного давления противоположен в холодное и теплое время года. В [Веретененко, Тайл, 2008] для средних широт также отмечается тенденция к росту давления после СПС в средней тропосфере и нижней стратосфере.

Отклик атмосферы на явления солнечной активности, как отмечалось в ряде работ [Мустель, 1974; Tinsley, Deen, 1991; Veretenenko, Thejll, 2013], более четко проявляется в холодный период года, когда наблюдается усиление циклонической деятельности в умеренных широтах в результате увеличения температурных контрастов в тропосфере. Сезонная вариация температурных градиентов в умеренных и высо-

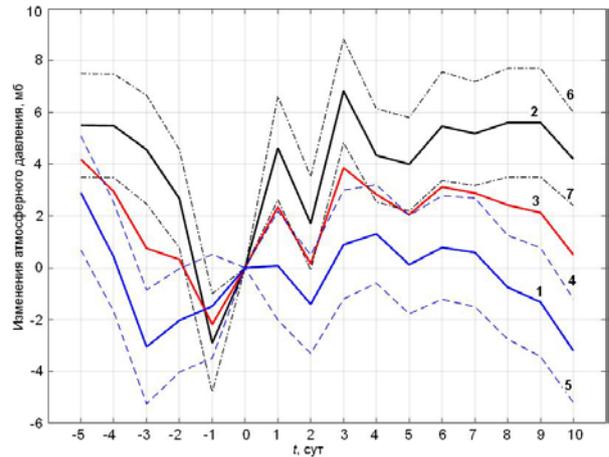


Рис. 3. Вариации атмосферного давления во время вспышки СКЛ (GLE) в теплое (кривая 1) и холодное (кривая 2) время года и в среднем за год (кривая 3). Кривыми 4, 5 и 6, 7 показаны границы доверительного интервала $\pm 3\sigma$

ких широтах Северного полушария возникает вследствие хорошего прогрева континентальной поверхности в летний период и сильного выхолаживания в зимний.

Рассмотрим для холодного и теплого времен года поведение среднемассовой и приземной температуры атмосферы в период ФП. Среднемассовая температура представляет собой средневзвешенную по массе температуру атмосферы

$$T_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \Delta h_i}{\sum_{i=1}^n \Delta h_i},$$

где T_i — температура слоя (изобары) i атмосферы; $\Delta h_i = h_{\text{imax}} - h_{\text{imin}}$ — разность между значениями h , определяющими границы слоя для i -й изобары. Поскольку атмосферное давление на каждом уровне равно весу вышележащего столба воздуха, т. е. пропорционально массе воздуха в этом столбе, Δh_i будет характеризовать массу слоя i -й изобары. Приземная температура — это температура приземного слоя атмосферы (уровень $(h-950)$ мб). Информация о температурном режиме атмосферы взята из базы часовых данных [<http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin>], которая содержит результаты NCEP [<https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs>]. Были рассмотрены 47 ФП, наблюдавшихся с 2000 г.: 27 были зарегистрированы в теплое время года (апрель–сентябрь), 20 — в холодное время года (октябрь–март), из них 11 — в зимний период (декабрь–февраль). На рис. 5 приведены вариации среднемассовой и приземной температуры в период ФП в средних широтах для зимы, а также для холодного и теплого времен года.

Со спадом интенсивности КЛ наблюдается возрастание атмосферного давления, среднемассовой и приземной температуры. Среднемассовая температура при этом увеличивается почти на градус ($\Delta T_{\text{см}} = +0.84$ °C), а приземная температура — на два градуса ($\Delta T_{\text{пр}} = +2.38$ °C). В минимуме ФП (через +2 сут) рост температуры прекращается. С ростом интенсивности КЛ на фазе восстановления ФП начинается спад температуры: наименьшего значения среднемассовая температура достигает ($\Delta T_{\text{см}} = -1.9$ °C)

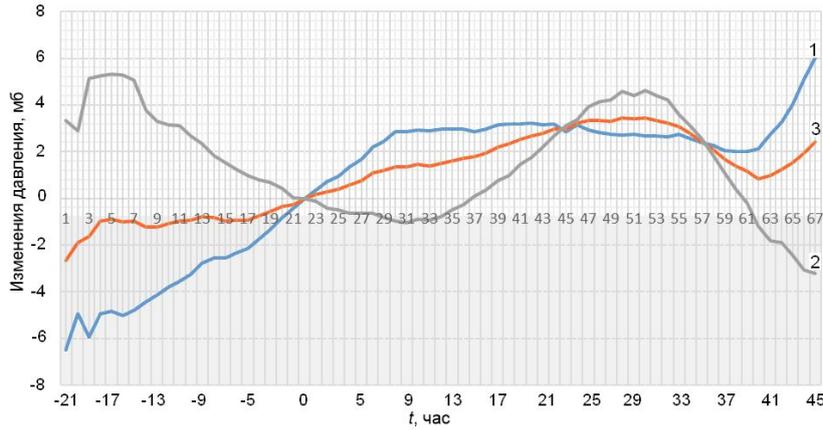


Рис. 4. Вариации атмосферного давления (с часовым временным разрешением) во время GLE в холодное (кривая 1), теплое (кривая 2) время года и в среднем за год (кривая 3)

на седьмые сутки (+7 сут), приземная температура ($\Delta T_{пр} = -2.03$) — на девятые сутки (+9 сут). С дальнейшим ростом интенсивности КЛ на фазе восстановления ФП изменения атмосферного давления Δh , среднемассовой $\Delta T_{см}$ и приземной $\Delta T_{пр}$ температуры приближаются к нулевым значениям. Вариации среднемассовой и приземной температуры атмосферы во время ФП более четко выражены в зимний (декабрь–февраль) период (рис. 5, а), а также в холодное (октябрь–март) время года (рис. 5, б). Во всех случаях (рис. 5, а–в) вариации температуры атмосферы носят волновой характер.

Ионизация атмосферы КЛ приводит к изменениям ее химического и аэрозольного состава [Пудовкин, Распопов, 1993], которые происходят без значительной временной задержки [Shumilov et al., 1996]. Изменения химического состава атмосферы (концентрация малых составляющих H_2O , O_3 , NO_2 и др.), концентрации и размеров аэрозольных частиц обуславливают изменения прозрачности атмосферы и состояния облачного покрова. В результате происходит модуляция потока солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу. Таким образом, изменения радиационно-теплового баланса тропосферы обусловлены влиянием КЛ на скорость ионизации. С падением интенсивности КЛ на начальном этапе ФП (рис. 5) происходит уменьшение скорости ионизации в атмосфере, что приводит к увеличению ее прозрачности и уменьшению облачности. В результате возрастает приток солнечной энергии, что приводит к возрастанию температуры атмосферы. И, наоборот, с ростом интенсивности КЛ на фазе восстановления ФП происходит уменьшение температуры атмосферы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время ФП на средних широтах (район Новосибирска) наблюдается увеличение атмосферного давления на спаде, в минимуме и начальной фазе восстановления интенсивности КЛ. По длительности этот отклик атмосферы практически совпадает с ФП. Атмосферное давление достигает максимума на пятые сутки от начала ФП. Статистически значимый эффект возрастания давления в период ФП

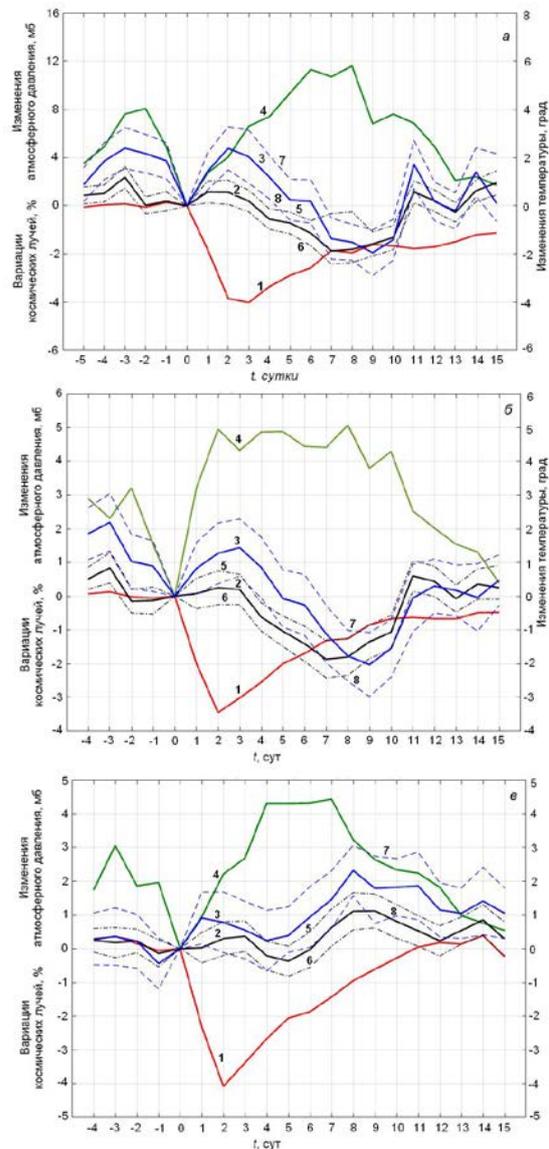


Рис. 5. Вариации интенсивности космических лучей (кривая 1), среднемассовой (кривая 2) и приземной (кривая 3) температуры атмосферы, а также атмосферного давления (кривая 4) во время ФП зимой (а), в холодное (б) и теплое (в) полугодие. Кривыми 5, 6 и 7, 8 показаны границы доверительного интервала $\pm 3\sigma$

на средних широтах (район Новосибирска) имеет место в осенне-зимний период.

Для рассматриваемого среднеширотного региона также отмечается тенденция к росту давления после GLE, но только в холодное время года.

Со спадом интенсивности КЛ и с ростом атмосферного давления наблюдается возрастание среднemasсовой и приземной температуры. Среднemasсовая температура при этом увеличивается почти на градус, а приземная температура — на два градуса. В минимуме ФП рост температуры прекращается. С ростом интенсивности КЛ на фазе восстановления ФП начинается спад температуры. Среднemasсовая температура достигает наименьшего значения на седьмые сутки; приземная температура — на девятые сутки. Статистически значимые вариации среднemasсовой и приземной температуры атмосферы в период ФП наблюдаются в холодное (октябрь–март) время года.

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.ckrf.ru/usu/433536>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Веретененко С.В. Особенности пространственно-временной структуры эффектов солнечной активности и вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2017. 327 с.
- Веретененко С.В., Пудовкин М.И. Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 1993. Т. 33, № 6. С. 35–40.
- 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.
- 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.
- Лушников А.А., Загайнов В.А., Любовева Ю.С., Гвишиани А.Д. Образование наноаэрозолей в тропосфере под действием космического излучения. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 50, № 2. С. 175–184. DOI: [10.7868/S0002351514020072](https://doi.org/10.7868/S0002351514020072).
- Мустель Э.Р. Современное состояние вопроса о реальности корпускулярно-атмосферных связей. *Солнечно-атмосферные связи в теории климата и прогнозах погоды*. Л.: Гидрометеоздат, 1974. С. 7–18.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М. Физический механизм воздействия солнечной активности и других геофизических факторов на состояние нижней атмосферы и климат. *Успехи физических наук. Конференции и симпозиумы*. 1993. Т. 163, № 7. С. 113–116.
- Artamonova I., Veretenenko S. Galactic cosmic ray variation influence on baric system dynamics at middle latitudes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73, iss. 2/3. P. 366–370. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.05.004](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.05.004).
- Artamonova I., Veretenenko S. Atmospheric pressure variations at extratropical latitudes associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays. *Adv. Space Res.* 2014. Vol. 54, iss. 12. P. 2491–2498. DOI: [10.1016/j.asr.2013.11.057](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.057).
- Dorman L. *Cosmic Rays in the Earth's Atmosphere and Underground*. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 2004. 862 p.
- Ermakov V.I., Stozhkov Y.I. *Thunderstorm Cloud Physics*. Preprint N 2. Moscow: Lebedev Physical Institute, 2004. 36 p.
- Harrison R.G., Tammiet H. Ions in the terrestrial atmosphere and other solar system atmospheres. *Space Sci. Rev.* 2008. Vol. 137. P. 107–118. DOI: [10.1007/s11214-008-9356-x](https://doi.org/10.1007/s11214-008-9356-x).
- Kniveton D.R. Precipitation, cloud cover and Forbush decreases in galactic cosmic rays. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. Vol. 66, iss. 13-14. P. 1135–1142. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.05.010](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.010).
- Lee S.H., Reeves J.M., Wilson J.C., et al. Particle formation by ion nucleation in the upper troposphere and lower stratosphere. *Science*. 2003. Vol. 301. P. 1886–1889. DOI: [10.1126/science.1087236](https://doi.org/10.1126/science.1087236).
- Marsh N.D., Svensmark H. Low clouds properties influenced by cosmic rays. *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85. P. 5004–5007. DOI: [10.1103/PhysRevLett.85.5004](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.85.5004).
- Ney E.P. Cosmic radiation and the weather. *Nature*. 1959. Vol. 183. P. 451–452. DOI: [10.1038/183451a0](https://doi.org/10.1038/183451a0).
- Pallé E., Butler C.J., O'Brien K. The possible connection between ionization in the atmosphere by cosmic rays and low level clouds. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. Vol. 66. P. 1779–1790. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.07.041](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.07.041).
- Pudovkin M.I., Veretenenko S.V. Cloudiness decreases associated with Forbush-decreases of galactic cosmic rays. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1995. Vol. 57, no. 11. P. 1349–1355. DOI: [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., Kyrö E. Meteorological characteristic changes in the high-latitude atmosphere associated with Forbush decreases of the galactic cosmic rays. *Adv. Space Res.* 1997. Vol. 20, no. 6. P. 1169–1172. DOI: [10.1016/S0273-1177\(97\)00767-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00767-9).
- 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. P. 1143–1149. DOI: [10.1016/j.jastp.2004.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2004.05.006).
- Shumilov O.I., Kasatkina E.A., Henriksen K., Vashenuk E. Enhancement of stratospheric aerosol after solar proton event. *Ann. Geophys.* 1996. Vol. 4, no. 11. P. 1119–1123. DOI: [10.1007/s00585-996-1119-y](https://doi.org/10.1007/s00585-996-1119-y).
- Svensmark H. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Phys. Rev. Lett.* 1998. Vol. 81, no. 22. P. 5027–5030. DOI: [10.1103/PhysRevLett.81.5027](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.81.5027).
- Tinsley B.A. A working hypothesis for connections between electrically-induced changes in cloud microphysics and storm vorticity, with possible effects on circulation. *Adv. Space Res.* 2012. Vol. 50, iss. 6. P. 791–805. DOI: [10.1016/j.asr.2012.04.008](https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.008).
- 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. P. 22283–22296. DOI: [10.1029/91JD02473](https://doi.org/10.1029/91JD02473).
- Tinsley B.A., Zhou L. Initial results of a global circuit model with stratospheric and tropospheric aerosols. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. D16205. DOI: [10.1029/2005JD006988](https://doi.org/10.1029/2005JD006988).
- 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, no. D12. P. 14783–14792. DOI: [10.1029/JD094iD12p14783](https://doi.org/10.1029/JD094iD12p14783).
- Usoskin I.G., Kovaltsov G.A. Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications. *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. D21206. DOI: [10.1029/2006JD007150](https://doi.org/10.1029/2006JD007150).
- Veretenenko S., Thejll P. Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlan-

tic. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.* 2004. Vol. 66. P. 393–405.
DOI: [10.1016/j.jastp.2003.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.11.005).

Veretenenko S., Thejll P. Influence of energetic solar proton events on the development of cyclonic processes at extratropical latitudes. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013. Vol. 409, 012237. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012237](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012237).

URL: <http://crsa.izmiran.ru/phpmyadmin> (дата обращения 29 апреля 2024 г.).

URL: <https://www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs> (дата обращения 29 апреля 2024 г.).

URL: <http://193.232.24.200/nvbk/main.htm> (дата обращения 29 апреля 2024 г.).

URL: <https://gle.oulu.fi/> (дата обращения 29 апреля 2024 г.).

URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 29 апреля 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

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.
DOI: [10.12737/szf-104202407](https://doi.org/10.12737/szf-104202407).