

---

**ВЕРХНЯЯ ИОНОСФЕРА  
В ПЕРИОД ВСПЫШЕК СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
И ФОРБУШ-ПОНИЖЕНИЙ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ  
TOPSIDE IONOSPHERE DURING SOLAR COSMIC RAY BURSTS  
AND FORBUSH DECREASES IN GALACTIC COSMIC RAYS**

---

**В.Л. Янчуковский** 

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

**А.Ю. Белинская** 

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Новосибирск, Россия, BelinskayaAY@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*

**A.Yu. Belinskaya**

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

---

**Аннотация.** В работе рассматривается поведение верхней ионосферы на высотах слоя F2 во время форбуш-понижений галактических космических лучей (ФП ГКЛ) и вспышек солнечных космических лучей (СКЛ). Используются результаты длительных непрерывных наблюдений космических лучей и ионосферы в Новосибирске за период с 1968 по 2021 г. Ионосферные возмущения в слое F2 в период ФП ГКЛ, которые сопровождалась магнитными бурями, наблюдаются в виде отрицательной фазы ионосферной бури. Глубина понижения электронной концентрации и, соответственно, критической частоты слоя F2 на отрицательной фазе возмущения F-слоя ионосферы растет с увеличением *Dst*-индекса геомагнитной бури. Рост амплитуды отрицательного ионосферного возмущения становится все более значительным в зависимости от величины форбуш-понижения. По истечении восьми суток после вспышки СКЛ и фронта ФП ГКЛ наблюдается всплеск амплитуды суточного хода критической частоты слоя F2 ионосферы. Высказано предположение, что он вызван возмущениями в нижней атмосфере в результате значительных вариаций интенсивности потоков СКЛ и ГКЛ.

**Ключевые слова:** солнечные космические лучи, галактические космические лучи, ионосфера, геомагнитное возмущение.

---

**Abstract.** The paper considers the behavior of the upper ionosphere at heights of the F2 layer during Forbush decreases in galactic cosmic rays (GCR FDs) and solar cosmic ray (SCR) bursts. We use the results of long-term continuous observations of cosmic rays and the ionosphere in Novosibirsk for the period from 1968 to 2021. The ionospheric disturbances in the F2 layer during GCR FDs, which were accompanied by a magnetic storm, took the form of an ionospheric storm negative phase. The scale of the negative phase of the ionospheric F-layer disturbance increases with increasing *Dst* index of the geomagnetic storm. This increase in the amplitude of the ionospheric disturbance becomes more and more significant depending on the magnitude of Forbush decreases. A burst of the amplitude of the daily variation in the F2-layer critical frequency occurred eight days after SCR bursts and GCR FD front. We assume that this burst might have been caused by disturbances in the lower atmosphere due to significant variations in the intensity of SCR and GCR fluxes.

**Keywords:** solar cosmic rays, galactic cosmic rays, ionosphere, geomagnetic disturbance.

---

## ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера представляет собой сильно ионизированную часть верхней атмосферы. К основным параметрам ионосферы относятся электронная концентрация, ионный состав и температура, которые изменяются сложным образом с высотой. Наблюдаются следующие высотные области (слои) максимальной электронной концентрации: D (80 км), E (110 км) и F-слой, который делится на F1 (170 км) и F2 (300 км) [Альперт, 1972]. Высота слоев, их ионно-электронный и химический состав и другие параметры подвержены значительным изменениям во времени, как регулярным, так и спорадическим.

Числа Вольфа, используемые на протяжении почти двух столетий для поиска связей между уровнем активности Солнца и состоянием атмосферы, отражают только общий уровень активности в 11-летнем цикле, но не отражают количество энергии, поступающее в атмосферу Земли при конкретном солнечном возмущении. Наиболее сильным проявлением солнечной активности являются солнечные вспышки — спорадические взрывные процессы, вызывающие резкие увеличения потоков жесткого ультрафиолета, рентгеновских и гамма-лучей, а также энергичных элементарных частиц солнечных космических лучей (СКЛ). Они, в свою очередь, воздействуют на маг-

нитосферу, провоцируя глобальные магнитные возмущения, и на атмосферу Земли, увеличивая ионизацию во всех ее слоях, влияя на химический состав и прозрачность. Поэтому при изучении механизмов солнечно-земных связей обычно рассматриваются: интенсивность солнечного излучения в видимой и инфракрасной областях спектра, интенсивность ультрафиолетового и рентгеновского излучений Солнца, потоки солнечных (СКЛ) и галактических (ГКЛ) космических лучей, межпланетное магнитное поле. Во время солнечных хромосферных вспышек, когда происходит повышение радиации всех видов, наблюдаются внезапные ионосферные возмущения, проявляющиеся в возрастании электронной концентрации: в области D ионосферы — до нескольких порядков, в E-области — на 50–200 %, в F-области — на 10–30 % [Митра, 1977]. Куницын и др. [2015] провели исследование внезапных увеличений электронной концентрации в верхней атмосфере по данным систем GNSS (Global Navigation Satellite System) для ряда солнечных вспышек X-класса 23-го и 24-го циклов солнечной активности. Анализ показал, что степень воздействия на ионосферу, определяемая вариациями полного электронного содержания и скоростью его изменения, слабо связана с интенсивностью вспышки в рентгеновском диапазоне и определяется главным образом величинами вариаций жесткого УФ-излучения Солнца, которые не всегда хорошо коррелируют с интенсивностью вспышки в рентгеновском диапазоне.

Исследование многолетнего отклика E-слоя на солнечные рентгеновские вспышки по данным наземного вертикального зондирования ионосферы на ст. Москва и на пяти японских станциях с 1969 по 2015 г. проведено в работе [Гивишвили, Лещенко, 2022]. Обнаружено долговременное возрастание доли рентгеновского излучения в суммарной скорости ионизации E-слоя ионосферы в течение всего анализируемого периода со скоростью, не зависящей от цикла солнечной активности. Зависимости скорости тренда от широты (в диапазоне 26°–56° N) и долготы (37°–128° E) не выявлено.

На основе данных навигационных спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС рассмотрены приращения полного электронного содержания (DTEC) во время солнечных вспышек, произошедших в максимуме 23-го (28 октября 2003 г.) и минимуме 24-го (6 сентября 2017 г.) циклов солнечной активности в одно время года и при близких зенитных углах Солнца [Смирнов, Смирнова, 2019]. Показано, что положительный всплеск DTEC составил 1.5–2 мин, при этом общая длительность отклика равнялась примерно 10 мин и не зависела от мощности солнечной вспышки.

Ниже рассматриваются результаты наблюдений космических лучей (КЛ) и ионосферы на высотах слоя F2 во время фобуш-понижений ГКЛ и вспышек СКЛ.

## ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И АНАЛИЗ

Были привлечены результаты наблюдений на станции КЛ «Новосибирск» (данные нейтрон-

ного монитора 24NM-64 площадью сбора 24 м<sup>2</sup>) [<http://193.232.24.200/nvbk/main.htm>] и на ионосферной станции «Новосибирск» (АИС и ионозонд «Парус») [<http://im.ipgg.sbras.ru>] за период с 1968 г. по 2021 г. Рассматривались солнечные протонные события (СПС) — вспышки КЛ, наблюдаемые на широте Новосибирска (жесткость геомагнитного обрезания  $R_c=2.91$  ГВ) в виде так называемых наземных возрастных солнечных космических лучей (Ground Level Enhancement — GLE). Были привлечены GLE-события с амплитудой 2.5 % и более от уровня фона. Общее количество таких зарегистрированных событий за указанный период составило 18, из них пять имели амплитуду 2.5–4.5 %, пять — 4.5–5.5 %, три — 5.6–9.5 %, два — 10–15 %, два — 20–30 % и одно — 127 %. При анализе был использован метод наложенных эпох (МНЭ). За нулевой принят момент времени максимума вспышки СКЛ. В качестве характеристики слоя F2 ионосферы рассматривается критическая частота  $f_oF2$ . На рис. 1 представлено распределение среднесуточных значений и амплитуды суточного хода  $f_oF2$  относительно вспышки СКЛ для 18 GLE-событий.

Ошибки средних значений указаны штриховыми линиями. Наблюдается возрастание среднесуточных значений  $f_oF2$  во время GLE и в первый день после него, тогда как амплитуда суточного хода (разница между максимумом днем и минимумом ночью) с момента GLE резко падает (синие линии на рис. 1, б соответствуют средним значениям амплитуд до и после вспышки СКЛ). Этот перепад составляет 12.5 %. Наблюдаемые различия средних до и после события статистически значимы согласно критерию Стьюдента (уровень значимости  $p=0.05$ ): рассчитанный  $t=3.2$  при степенях свободы 8 больше табличного 2.3.

Проникновение в атмосферу протонов СКЛ приводит к возмущению в ионосфере, называемому поглощением в полярной шапке (ППШ). ППШ характерно для высоких широт, где в атмосферу в результате вспышек на Солнце свободно могут поступать солнечные протоны малых энергий от 10 МэВ [Дриацкий, 1974]. В рассматриваемых событиях в результате солнечной вспышки образуются протоны с энергией, значительно превышающей геомагнитный порог обрезания (2.91 ГВ) среднеширотной станции КЛ Новосибирск. Происходит как бы расширение авроральной области, где наблюдаются возмущения во всей толще ионосферы. В период возмущений поведение F2-слоя обычно представляют как абсолютную (в МГц) или относительную (в %) разницу между  $f_oF2$  в период бури и в выбранные спокойные дни (или месячной медианы) [Данилов, 2013]:

$$\delta f_oF2 = [f_oF2_{\text{набл}} - f_oF2_{\text{мед}}] / f_oF2_{\text{мед}}$$

На рис. 2 показаны относительные вариации  $\delta f_oF2$  в период регистрируемых вспышек СКЛ на средних широтах (для 18 GLE-событий).

ППШ характерно для D-слоя ионосферы, где может происходить увеличение электронной концентрации на два порядка [Митра, 1977]. В слое F ионосферы наблюдаются (рис. 2) как увеличения, так и

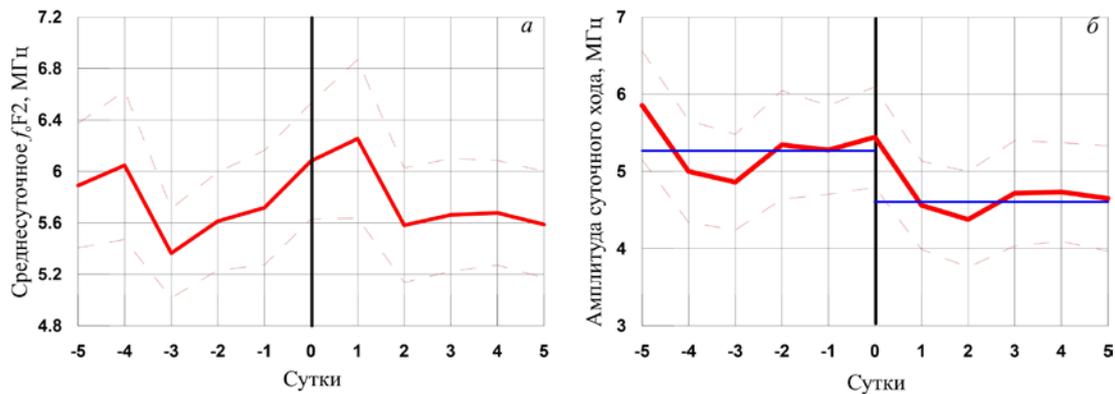


Рис. 1. Распределение среднесуточных значений (а) и амплитуды суточного хода (б) критической частоты  $f_oF2$ . Штриховые линии — ошибки средних значений

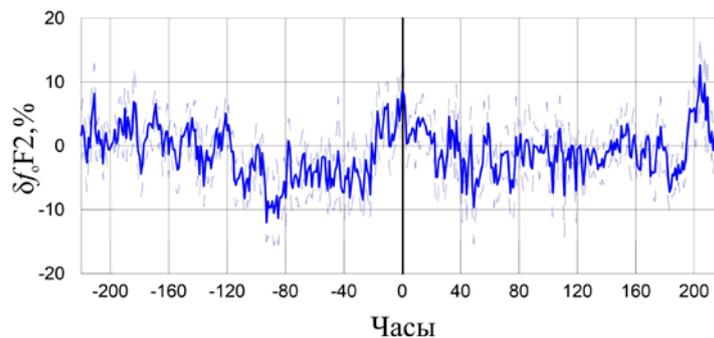


Рис. 2. Вариации критической частоты слоя F2 ионосферы в период вспышек СКЛ. Штриховые линии — ошибки средних значений

уменьшения  $f_oF2$ , а значит, и электронной концентрации. Возрастание критической частоты слоя F2 совпадает с моментом максимума вспышки СКЛ и составляет более 7 %. Генерация СКЛ во время вспышек сопровождается обычно значительным возрастанием интенсивности УФ в различных спектральных интервалах, при этом УФ-излучение 55–65 и 85–95 нм приводит к заметному увеличению электронной концентрации, а УФ 15–20 нм является причиной отрицательного возмущения F-слоя ионосферы [Леонович, Тащилин, 2008; Леонович и др., 2010]. УФ-излучение достигает Земли за 8.5 мин, СКЛ — менее чем через 1 ч. В результате мы наблюдаем возмущения F-слоя ионосферы обоих знаков. Обращает внимание наличие более значительного возрастания  $f_oF2$  по истечении восьми суток. Второе увеличение выражено более ярко и превышает 13 %. Однако второй положительный всплеск  $f_oF2$ , четко наблюдаемый по истечении восьми суток, не является результатом изменений ионизирующего агента (УФ).

Начиная с 1968 г. с помощью нейтронного монитора в Новосибирске наблюдались 189 форбуш-понижений галактических космических лучей (ФП ГКЛ), из которых 135 сопровождалось и 54 не сопровождалось магнитными бурями. Все события рассматривались в зависимости от величины ФП, для чего разбивались на группы: 1 — с амплитудой 2.5–4.5 %; 2 — с амплитудой 5–7 %, 3 — с амплитудой 8 % и более. ФП, которые сопровождалось геомагнитными бурями, группировались дополнительно в зависимости от величины  $Dst$ -индекса геомагнитной активности: 1 —  $Dst \geq -100$  нТл; 2 —

$Dst = -100 \div -150$  нТл; 3 —  $Dst \leq -200$  нТл. Был использован также МНЭ. За нулевой момент принимался момент регистрации фронта форбуш-понижения ГКЛ. Относительные вариации критической частоты слоя F2 ионосферы в период ФП ГКЛ представлены на рис. 3.

Из 54 ФП, не сопровождавшихся магнитными бурями (рис. 3, а), 44 события имели амплитуду 2.5–4.5 % (кривая 1), 7 событий — 5–7 % (кривая 2), 3 события —  $\geq 8$  % (кривая 3). Можно определенно говорить об отсутствии связи вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы с ФП без магнитных бурь только для ФП с амплитудой до 5 % (кривая 1).

Из 135 ФП, сопровождавшихся магнитными бурями (рис. 3, б), 59 событий были с амплитудой 2.5–4.5 % (кривая 1), 51 событие — с амплитудой 5–7 % (кривая 2), 25 событий — с амплитудой  $\geq 8$  % (кривая 3). Главная фаза ФП часто совпадает с главной фазой магнитной бури. Реакция слоя F2 ионосферы (рис. 3, б) проявляется в понижении его критической частоты, что соответствует уменьшению электронной концентрации  $N_e$ . Для всех 135 случаев ионосферная буря над Новосибирском наблюдалась только в виде отрицательного возмущения. Следует заметить, что динамика возмущения повторяет профиль форбуш-эффекта ГКЛ. С увеличением амплитуды ФП ГКЛ возрастает и амплитуда ионосферного возмущения (рис. 3, б): при ФП 2.5–4.5 % глубина понижения  $f_oF2$  на отрицательной фазе ионосферной бури оказывается равной 13 % (кривая 1), при ФП 5–7 % — 15 % (кривая 2), а при ФП  $\geq 8$  % превышает 22 % (кривая 3). ФП ГКЛ могут сопровождаться геомагнитными бурями любой интенсив-

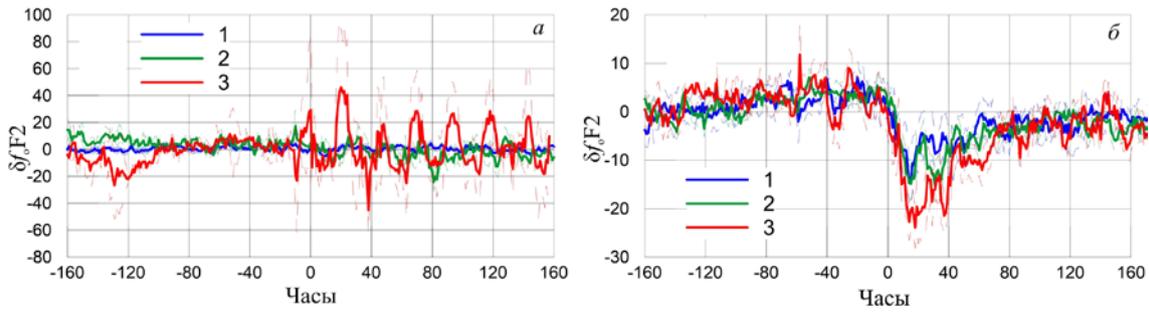


Рис. 3. Вариации критической частоты  $\delta f_oF2$  в периоды форбуш-понижений с амплитудами 2.5–4.5 % (кривая 1), 5–7 % (кривая 2) и не менее 8 % (кривая 3), не сопровождавшихся (а) и сопровождавшихся (б) магнитными бурями. Штриховые линии — ошибки средних значений

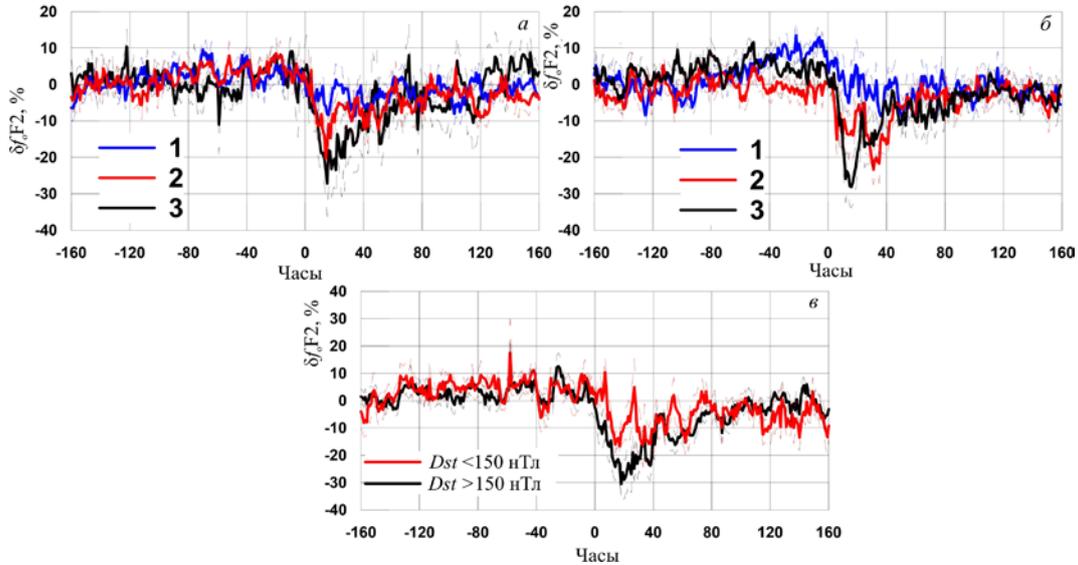


Рис. 4. Вариации критической частоты слоя F2 ионосферы в период форбуш-понижений ГКЛ с амплитудами 2.5–4.5 % (а), 5–7 % (б) и не менее 8 % (в), которые сопровождались геомагнитными бурями с индексами  $Dst \geq -100$  нТл (кривая 1),  $-100 \div -150$  нТл (кривая 2) и менее  $-150$  нТл (кривая 3). Штриховые линии — ошибки средних значений

ности. На рис. 4 показаны возмущения в слое F2 ионосферы для геомагнитных бурь с различными значениями  $Dst$ -индекса, которые сопровождали ФП ГКЛ различной амплитуды.

Глубина понижения  $f_oF2$  и, соответственно, электронной концентрации F-слоя ионосферы на отрицательной фазе возмущения растет с увеличением  $Dst$ -индекса геомагнитной бури (рис. 4). Рост амплитуды ионосферного возмущения становится все более значительным в зависимости от величины ФП, которые сопровождаются этими геомагнитными бурями.

На рис. 5 представлены распределения среднесуточных значений амплитуды суточного хода  $f_oF2$  относительно фронта ФП ГКЛ.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Максимум отрицательной фазы ионосферной бури приходится на первые сутки после прохождения фронта ФП (рис. 5, а), а через несколько (3–4) суток ионосфера практически возвращается в предбуревое состояние. Однако обращает на себя внимание поведение амплитуды суточного хода критической частоты слоя F2 (рис. 5, б). По истечении восьми суток происходит резкое увеличение амплитуды суточного хода  $f_oF2$ . Этот всплеск наблюдается как

для ФП без геомагнитных бурь (кривая 1), так и для ФП, сопровождавшихся геомагнитными бурями (кривая 2). Резкое увеличение амплитуды суточного хода  $f_oF2$  составляет 1.7–2 МГц, что соответствует 32–40 %.

Считается, что отрицательная фаза ионосферной бури вызвана изменениями состава термосферного газа в результате нагрева термосферы ионосферными токами во время геомагнитных возмущений. Этот механизм был впервые предложен Ситоном [Seaton, 1956]. В максимуме слоя F2 электронная концентрация  $N_e$  оказывается практически пропорциональна отношению  $[O]/[N_2]$  [Mikhailov et al., 1995]. Движение отрицательного ионосферного возмущения вызвано сильными меридиональными ветрами, которые генерируются в полярной области и направлены к экватору. На главной фазе геомагнитной бури отрицательная фаза ионосферного возмущения обычно сменяется положительной [Данилов, 2013]. В качестве возможных источников формирования положительной фазы ионосферной бури было предложено несколько механизмов [Danilov, Belik, 1992; Prolss, 1995]: подъем слоя F2 из-за вертикального дрейфа, потоки плазмы из плазмосферы, даунвеллинг газа в результате индуцированной бурей термосферной циркуляции. Считается [Данилов, 2013],

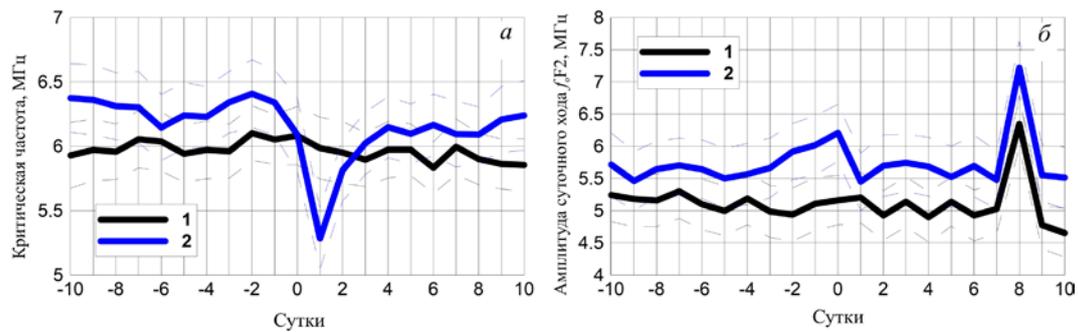


Рис. 5. Распределение среднесуточных значений (а) и амплитуды суточного хода (б) критической частоты слоя F2 ионосферы относительно фронта фронт-понижения ГКЛ для ФП, не сопровождавшихся (кривая 1) и сопровождавшихся (кривая 2) геомагнитными бурями. Штриховые линии — ошибки средних значений

что положительная фаза ионосферной бури вызывается перемещающимися атмосферными возмущениями, перенесенными направленным к экватору меридиональным ветром.

Концепция термосферной бури [Seaton, 1956; Rishbeth, Barron, 1960; Danilov, Belik, 1992; Prolss, 1995; Данилов, 2013; Ратовский и др., 2018] предполагает, что основными факторами при формировании отклика ионосферы являются состав термосферы и ветровые возмущения, вызванные нагревом термосферы в высокоширотной области. Результаты статистического анализа и моделирования [Ratovsky et al., 2020] показали, что отклики высокоширотной ионосферы на фазе восстановления не противоречат концепции термосферной бури. По результатам моделирования был сделан вывод, что наличие сильного положительного отклика можно объяснить сильным воздействием нейтрального ветра в главную фазу геомагнитной бури. Положительные эффекты последствия на разных широтах обусловлены положительными возмущениями концентрации атомарного кислорода  $n(O)$ . В работе [Chernigovskaya et al., 2021] указывается, что в динамике среднеширотной ионосферы важную роль могут играть возмущения в виде термосферных волн молекулярного газа. Эти возмущения распространяются с востока на запад в течение нескольких суток после прекращения воздействия магнитосферного источника. Долготная неоднородность ионосферных эффектов, обусловленных термосферными волнами молекулярного газа, была выявлена при анализе данных среднеширотной евразийской цепи ионизационных зондирования [Черниговская и др., 2021].

В обзоре [Данилов, 2013] отмечается также, что некоторые эффекты, такие как длительная положительная фаза на средних широтах и отрицательная фаза на низких широтах, наблюдаемые во время выдающихся ионосферных бурь, нельзя объяснить горизонтальной динамикой и изменениями нейтрального состава. Возможно, при рассмотрении механизма формирования ионосферной бури необходимо учитывать и другие, принципиально различные группы процессов.

Следует отметить, что не все из рассмотренных событий (ФП ГКЛ) сопровождались геомагнитными бурями. Почти третья часть фронт-понижений (54 события), а также вспышки СКЛ не сопровожда-

лись магнитными бурями. Однако после всех событий наблюдается всплеск амплитуды суточного хода критической частоты слоя F2 ионосферы.

Ионосфера испытывает воздействие не только со стороны источников ионизации, изменения интенсивности которых вызваны процессами на Солнце и в магнитосфере Земли. Воздействие на ионосферу осуществляется также нижними слоями атмосферы. Изменения параметров слоя F2 ионосферы возможны и за счет изменений в нейтральном составе среды и динамических процессов в ней [Danilov, Laštovička, 2001]. В тропосфере и стратосфере на высотах от ~3 до 60 км основным источником ионизации являются космические лучи, интенсивность которых зависит от солнечной активности. В атмосфере максимумы ионизации ГКЛ находятся на высотах 10–20 км, а СКЛ — 20–60 км [Bazilevskaya, 2005]. Вариации космических лучей вызывают изменения как химического состава атмосферы, так и характеристик аэрозольных частиц [Лушников и др., 2014], что приводит к изменениям прозрачности атмосферы [Кудрявцев, Юнгер, 2011] и состояния облачного покрова [Распопов, Веретененко, 2009]. Изменения оптических свойств атмосферы модулируют солнечную энергию, поступающую в атмосферу, что, в свою очередь, вызывает изменения термобарического режима атмосферы и приводит к усилению циркуляции [Veretenenko, Thejll, 2004, 2005].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При генерации СКЛ в солнечных вспышках происходит увеличение интенсивности УФ в различных диапазонах, поэтому в момент регистрации вспышек СКЛ на Земле наблюдаются не только эффекты типа ППШ в D-слое ионосферы, но и возмущения электронной концентрации (а соответственно, критической частоты) обоих знаков в слое F2.

Ионосферные возмущения в слое F2 в период фронт-понижений ГКЛ, которые сопровождались магнитными бурями, наблюдаются в виде отрицательной фазы ионосферной бури. С увеличением амплитуды ФП возрастает и амплитуда ионосферного возмущения. ФП ГКЛ могут сопровождаться геомагнитными бурями любой интенсивности. Глубина понижения  $f_oF2$  на отрицательной фазе возмущения F-слоя ионосферы растет с увеличением  $Dst$ -индекса геомагнитной бури. Рост амплитуды отрицательного

ионосферного возмущения становится все более значительным в зависимости от величины форбуш-понижений, которые сопровождаются этими геомагнитными бурями.

По истечении восьми суток после регистрации вспышек СКЛ и фронта форбуш-понижения ГКЛ наблюдается всплеск амплитуды суточного хода критической частоты слоя F2 ионосферы.

Можно предположить, что наблюдаемый на восьмые сутки всплеск  $f_oF2$  и амплитуды суточного хода  $f_oF2$  вызван возмущениями в нижней атмосфере, причиной которых могут быть значительные вариации интенсивности потоков СКЛ и ГКЛ.

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

Альперт Я.Л. Распространение радиоволн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 563 с.

Гвишвили Г.В., Лещенко Л.Н. Многолетний тренд реакции E-слоя ионосферы на солнечные вспышки. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 51–57. DOI: [10.12737/szf-81202206](https://doi.org/10.12737/szf-81202206).

Данилов А.Д. Реакция области F на геомагнитные возмущения. *Гелиогеофизические исследования*. 2013. Вып. 5. С. 1–33.

Дриацкий В.М. *Природа аномального поглощения космического радиоизлучения в нижней ионосфере на высоких широтах*. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 224 с.

Кудрявцев И.В., Юнгер Х. Вариации прозрачности атмосферы под действием галактических космических лучей как возможная причина их влияния на формирование облачности. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2011. Т. 51, № 5. С. 668–676.

Куницын В.Е., Назаренко М.О., Нестеров И.А., Падохин А.М. Влияние солнечных вспышек на ионизацию верхней атмосферы. Анализ ряда значительных событий 23-го и 24-го солнечных циклов. *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*. 2015. № 4. С. 95–101.

Леонович Л.А., Тащилин А.В. Возмущения во внешней ионосфере во время солнечных вспышек. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48, № 6. С. 793–802.

Леонович Л.А., Тащилин А.В., Портнягина О.Ю. Зависимость отклика ионосферы от параметров солнечных вспышек на основе теоретического моделирования и данных GPS. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2010. Т. 50, № 2. С. 209–219.

Лушников А.А., Загайнов В.А., Любовцева Ю.С., Гвишвили 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).

Митра А. *Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли*. М.: Мир, 1977. 370 с.

Распопов О.М., Веретененко С.В. Солнечная активность и космические лучи: влияние на облачность и процессы в нижней атмосфере (памяти и к 75-летию М.И. Пудовкина). *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2009. Т. 49, № 2. С. 147–155.

Ратовский К.Г., Клименко М.В., Клименко В.В. и др. Эффекты последствий геомагнитных бурь: статистический анализ и теоретическое объяснение. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 32–42. DOI: [10.12737/szf-44201804](https://doi.org/10.12737/szf-44201804).

Смирнов В.М., Смирнова Е.В. Ионосферные эффекты двух солнечных вспышек максимума 23-го и минимума 24-го циклов солнечной активности. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 2. С. 82–88. DOI: [10.12737/szf-52201911](https://doi.org/10.12737/szf-52201911).

Черниговская М.А., Шпынев Б.Г., Ясюкевич А.С., Хабитуев Д.С. Возмущения термосферного молекулярного газа и их связь с долготными неоднородностями ионосферных возмущений в Северном полушарии во время геомагнитной бури. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2021. Т. 18, № 5. С. 295–304. DOI: [10.21046/2070-7401-2021-18-5-295-304](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2021-18-5-295-304).

Bazilevskaya G.A. Solar cosmic rays in the near Earth space and the atmosphere. *Adv. Space Res.* 2005. Vol. 35. P. 458–464. DOI: [10.1016/j.asr.2004.11.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2004.11.019).

Chernigovskaya M.A., Shpynev B.G., Yasyukevich A.S., et al. Longitudinal variations of geomagnetic and ionospheric parameters in the Northern Hemisphere during magnetic storms according to multi-instrument observations. *Adv. Space Res.* 2021. Vol. 67, no. 2. P. 762–776. DOI: [10.1016/j.asr.2020.10.028](https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.10.028).

Danilov A.D., Belik L.D. Thermospheric composition and the positive phase of an ionospheric storm. *Adv. Space Res.* 1992. Vol. 12, iss. 10. P. 257–260.

Danilov A.D., Laštovička J. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere. *J. Geomagn. Aeron.* 2001. Vol. 2, no. 3. P. 209–224.

Mikhailov A.V., Skoblin M.G., Forster M. Daytime F2-layer positive storm effect at middle and lower latitudes. *Ann. Geophys.* 1995. Vol. 13. P. 532–540. DOI: [10.1007/s00585-995-0532-y](https://doi.org/10.1007/s00585-995-0532-y).

Prolss G.W. Ionospheric F-region storms. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics* / Eds. H. Volland. Boca Raton: CRC Press, 1995. Vol. 2, ch. 8. P. 195–248.

Ratovsky K.G.; Klimenko M.V.; Yasyukevich Y.V., et al. Statistical analysis and interpretation of high-, mid- and low-latitude responses in regional electron content to geomagnetic storms. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, no. 12, 1308. DOI: [10.3390/atmos11121308](https://doi.org/10.3390/atmos11121308).

Rishbeth H., Barron R. Equilibrium electron distribution in the ionospheric F2-layer. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1960. Vol. 18, iss. 2-3. P. 234–252. DOI: [10.1016/0021-9169\(60\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(60)90095-7).

Seaton M.J. A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms. *J. Atmos. Terr. Phys.* 1956. Vol. 8, iss. 1. P. 122–123. DOI: [10.1016/0021-9169\(56\)90102-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(56)90102-7).

Veretenenko S.V., Thejll P. Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2004. Vol. 66, iss. 5. P. 393–405. DOI: [10.1016/j.jastp.2003.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2003.11.005).

Veretenenko S.V., Thejll P. Cyclone regeneration in the North Atlantic intensified by energetic solar proton events. *Adv. Space Res.* 2005. Vol. 35, no. 3. P. 470–475. DOI: [10.1016/j.asr.2005.01.079](https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.01.079).

URL: <http://193.232.24.200/nvbk/main.htm> (дата обращения 18 мая 2022 г.).

URL: <http://im.ipgg.sbras.ru> (дата обращения 18 мая 2022 г.).

URL: <http://www.ckp-rf.ru/usu/433536> (дата обращения 18 мая 2022 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Янчуковский В.Л., Белинская А.Ю. Верхняя ионосфера в период вспышек солнечных космических лучей и форбуш-понижений галактических космических лучей. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 3. С. 35–40. DOI: [10.12737/szf-83202205](https://doi.org/10.12737/szf-83202205).