

**АНАЛИЗ ГЕЛИО- И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ  
В ОКТЯБРЕ–НОЯБРЕ 2021 Г.  
ПО КОМПЛЕКСНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ИКФИА СО РАН**

**ANALYSIS OF HELIO- AND GEOPHYSICAL EVENTS  
IN OCTOBER–NOVEMBER 2021 FROM COMPREHENSIVE OBSERVATIONS  
OF SHICRA SB RAS**

**В.И. Козлов** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, v.kozlov@ikfia.ysn.ru*

**С.А. Стародубцев** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru*

**В.Г. Григорьев** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, grig@ikfia.ysn.ru*

**Д.Г. Байшев** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, baishev@ikfia.ysn.ru*

**Г.А. Макаров** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, gmakarov@ikfia.ysn.ru*

**Е.А. Павлов** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, pochta\_baki@mail.ru*

**Р.Р. Каримов** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, karimov@ikfia.ysn.ru*

**А.А. Корсаков** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, korsakovaa@ikfia.ysn.ru*

**А.Е. Степанов** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, a\_e\_stepanov@ikfia.ysn.ru*

**И.И. Колтовской** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, koltik@ikfia.ysn.ru*

**П.П. Аммосов** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, ammosov@ikfia.ysn.ru*

**Г.А. Гаврильева** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, gagavrilyeva@ikfia.ysn.ru*

**И.Б. Иевенко** 

*Институт космофизических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, ievenko@ikfia.ysn.ru*

**V.I. Kozlov**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, v.kozlov@ikfia.ysn.ru*

**S.A. Starodubtsev**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, starodub@ikfia.ysn.ru*

**V.G. Grigoryev**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, grig@ikfia.ysn.ru*

**D.G. Baishev**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, baishev@ikfia.ysn.ru*

**G.A. Makarov**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, gmakarov@ikfia.ysn.ru*

**E.A. Pavlov**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, pochta\_baki@mail.ru*

**R.R. Karimov**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, karimov@ikfia.ysn.ru*

**A.A. Korsakov**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, korsakovaa@ikfia.ysn.ru*

**A.E. Stepanov**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, a\_e\_stepanov@ikfia.ysn.ru*

**I.I. Koltovskoi**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, koltik@ikfia.ysn.ru*

**P.P. Ammosov**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, ammosov@ikfia.ysn.ru*

**G.A. Gavrilyeva**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, gagavrilyeva@ikfia.ysn.ru*

**I.B. Ievenko**

*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, ievenko@ikfia.ysn.ru*

**С.Г. Парников** 

Институт космических исследований и аэронауки  
им. Ю.Г. Шафера СО РАН,  
Якутск, Россия, parnikov@ikfia.ysn.ru

**S.G. Parnikov**

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research  
and Aeronomy SB RAS,  
Yakutsk, Russia, parnikov@ikfia.ysn.ru

**Аннотация.** Приведены результаты комплексных наблюдений проявлений космической погоды во время геофизических событий в конце октября – начале ноября 2021 г. на Якутской меридиональной геофизической сети ИКФИА СО РАН, включающей в себя комплекс различных научных приборов установленных на станциях «Якутск», «Маймага», «Жиганск» и «Тикси» (нейтронные мониторы, ионозонд, риометр, приемники ОНЧ-радишумов и сигналов навигационных радиостанций, магнитометры), а также комплекс оптических приборов установленных на ст. «Маймага». Представлены результаты анализа явлений, происходивших в околоземном космическом пространстве, ионосфере и атмосфере Земли в северо-восточном секторе Сибири. Изучены свойства наблюдавшихся в это время геофизических эффектов проявления космической погоды: форбуш-понижений космических лучей, геомагнитной бури и суббури, риометрического поглощения, возникновения электроструи, квазипериодических широкополосных радиопомех. Проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Земля—ионосфера, критических частот F2-слоя ионосферы, поглощения радиоволн коротковолнового диапазона, температуры нейтральной атмосферы, лучистой полосы сияния в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм, а также области интенсивных полярных сияний и авроральной красной дуги (SAR-дуга).

**Ключевые слова:** солнечная вспышка, магнитная буря, форбуш-понижение, полярное сияние, авроральная дуга, нейтронный монитор, ионозонд, риометр, приемник ОНЧ-радишумов и сигналов навигационных радиостанций, магнитометры.

**Abstract.** The paper reports the results of comprehensive observations of space weather manifestations during geophysical events at the end of October – beginning of November 2021 at the Yakut meridional geophysical network of SHICRA SB RAS equipped with a complex of various scientific instruments installed at the stations Yakutsk, Maimaga, Zhigansk, and Tixie Bay (neutron monitors, an ionosonde, a riometer, receivers of VLF radio noise and signals from navigation radio stations, magnetometers), as well as a complex of optical instruments installed in Maimaga. We present the results of the analysis of phenomena occurring in near-Earth space, Earth's ionosphere and atmosphere in the North-Eastern sector of Siberia. We examine the properties of the geophysical effects of space weather observed at this time: Forbush decreases of cosmic rays, geomagnetic storm and substorm, riometric absorption, the occurrence of electrojet, quasi-periodic broadband radio hisses, assess changes in the effective height of the Earth—ionosphere waveguide, F2-layer critical frequencies, absorption of short-wave radio waves, temperature of the neutral atmosphere, radiant auroral band in 557.7 and 630.0 nm emissions, as well as the region of intense auroras and auroral red arc (SAR arc).

**Keywords:** solar flare, magnetic storm, Forbush decrease, aurora, auroral arc, neutron monitor, ionosonde, riometer, receiver of VLF radio noise and signals from navigation radio stations, magnetometers.

## ВВЕДЕНИЕ

Новый 25-й цикл солнечной активности (СА) начался в декабре 2019 г., поэтому резкий всплеск геофизической активности в конце октября – начале ноября 2021 г. на начальной фазе роста очередного 11-летнего цикла является достаточно неожиданным.

Только с 26 октября по 2 ноября 2021 г. на Солнце было зарегистрировано семь вспышек класса М и одна вспышка класса X, которые произошли в одной активной области (АО) AR12887. Наряду с ними неоднократно наблюдались и корональные выбросы массы (КВМ) [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)]. В результате этого в околоземном космическом пространстве произошли значительные изменения космической погоды, и, как следствие этого, на Земле было зарегистрировано возрастание потоков солнечных космических лучей (СКЛ) и наблюдалась

вторая в текущем цикле СА сильная магнитная буря с минимальным значением индекса  $Dst < -105$  нТл.

## ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ КЛ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СТ. «ТИКСИ» И «ЯКУТСК»

Наиболее мощная в этот период времени солнечная вспышка балла X1.0 с максимумом эмиссии рентгеновских лучей в 15:35 UT 28 октября 2021 г. произошла в АО AR12887 и имела координаты S28W02. При этом было зарегистрировано сильное ультрафиолетовое излучение, а также радиоизлучение II и IV типов [<https://www.spaceweather.com>, <https://solarmonitor.org>]. Эта вспышка привела к первому зарегистрированному на Земле возрастанию потока СКЛ в новом 25-м цикле. Это событие стало 73-м со времени регистрации первой зарегистрированной на Земле вспышки СКЛ 28 февраля 1942 г. Сейчас оно

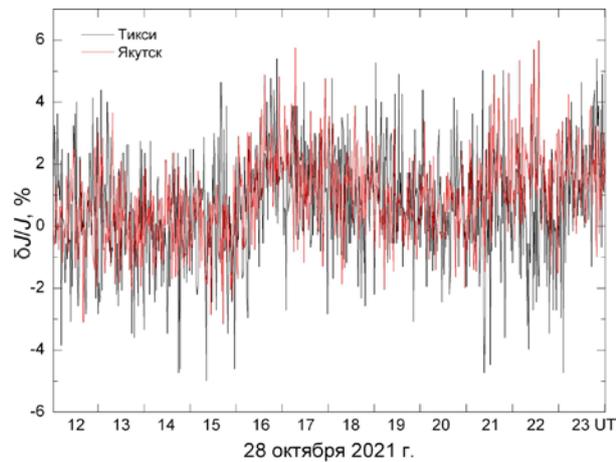


Рис. 1. Наземное возрастание интенсивности КЛ во время события GLE73 по данным нейтронных мониторов на ст. «Тикси» и «Якутск»

известно как GLE73 (Ground Level Enhancement). Возрастание было небольшим, его амплитуда даже на полярных станциях КЛ составила величину  $< 6\%$ . На рис. 1 показаны исправленные на давление одноминутные данные регистрации этого события нейтронными мониторами (НМ) 18-NM-64 на ст. «Тикси» и 24-NM-64 на ст. «Якутск». В это время обе станции находились на ночной стороне Земли и возрастание интенсивности КЛ в данных этих станций проявилось весьма слабо, его практически не видно на фоне текущих измерений (см. рис. 1). Как событие GLE его с уверенностью можно идентифицировать только с привлечением дополнительной информации из известной, наполняемой в режиме реального времени базы данных НМ с высоким разрешением по времени (Real-Time Database for High-Resolution Neutron Monitor Measurements — NMDB, [<http://www.nmdb.eu>]).

Произошедшая через несколько дней 2 ноября 2021 г. в этой же АО солнечная вспышка (S27W76) класса M1.7 [<https://solarmonitor.org>], вызвала первый в 25-м цикле мощный форбуш-эффект (ФЭ), который начался в конце 3 ноября. Его амплитуда по исправленным на давление 1-минутным данным регистрации НМ на ст. «Тикси» достигла величины  $18.9\%$ , а на ст. «Якутск» —  $16.1\%$  (рис. 2). Сложная структура понижения интенсивности КЛ обусловлена структурой пришедшего на орбиту Земли межпланетного КВМ, который имел скорость  $\sim 1470$  км/с [[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)].

Отметим, что в настоящее время принято считать, что структура межпланетного КВМ состоит из трех частей: межпланетной ударной волны (МУВ), области турбулентности за ней и последующего магнитного облака (МО) [Howard, 2011]. При этом МУВ является первой частью КВМ и порождается при распространении самого КВМ со сверхальфвеновской скоростью относительно солнечного ветра (СВ). Вторая часть (область турбулентности) является следствием взаимодействия МУВ с фоновыми параметрами СВ и характеризуется высоким уровнем их флуктуаций. Третьей частью в развитии КВМ является МО. Оно представляет собой движущееся от источника на Солнце облако плазмы, которое, в частности, характеризуется сильным регулярным

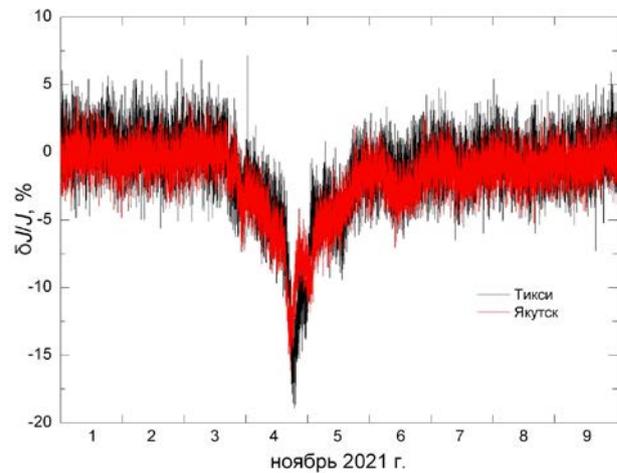


Рис. 2. Форбуш-эффект по измерениям нейтронных мониторов на ст. «Тикси» и «Якутск»

медленно вращающимся магнитным полем с пониженной концентрацией и температурой плазмы СВ.

В ИКФИА СО РАН с 2009 г. в режиме реального времени с целью прогноза наземных проявлений космической погоды проводится мониторинг интенсивности КЛ. Для этой цели наряду с другими мы применяем метод гармонического анализа, в котором используются также исправленные на давление одночасовые данные НМ, установленных на станциях КЛ «Тикси» и «Якутск» [Grigoryev et al., 2008; Krymsky et al., 2003]. В качестве примера на рис. 3, а, б показаны результаты определения параметров 1-й гармоники анизотропии КЛ одновременно на ст. «Тикси» и «Якутск». В верхней части указаны названия станций и тип детекторов, приведена проекция на плоскость XY используемой системы координат GSE, на которой указана длина единичного вектора 1-й гармоники (суточной) анизотропии КЛ. Внизу показана зависимость от времени самого вектора анизотропии КЛ, а ниже — соответствующая ему интенсивность КЛ. Заметим, что станции КЛ «Тикси» и «Якутск» разнесены на расстояние более 1200 км и имеют свои собственные источники электропитания, таким образом, проводимые на них измерения являются в полном смысле независимыми. Проекции векторов анизотропии КЛ показаны красным цветом, если одновременно на обеих станциях они превышают величину  $0.3\%$  и направлены от Солнца, что увеличивает наглядность прогноза приближения к Земле возмущения СВ.

Из механизма суточной вариации КЛ [Крымский, 1964] следует, что при спокойных условиях в СВ амплитуда суточной вариации должна составлять величину в среднем около  $0.3\text{--}0.4\%$ , а анизотропия должна иметь направление на 18 LT (положительное направление оси OY в системе координат GSE). Многолетние исследования показывают, что, действительно, в целом наблюдается именно такая картина. Однако при возмущениях СВ она кардинально меняется. Наблюдаются значительные отклонения от этих средних: изменяются и амплитуда, и направление анизотропии КЛ. В частности, появляется компонента вектора анизотропии КЛ в направлении от Солнца. Физически это означает, что к Земле приближается крупномасштабное возмущение СВ. Оно

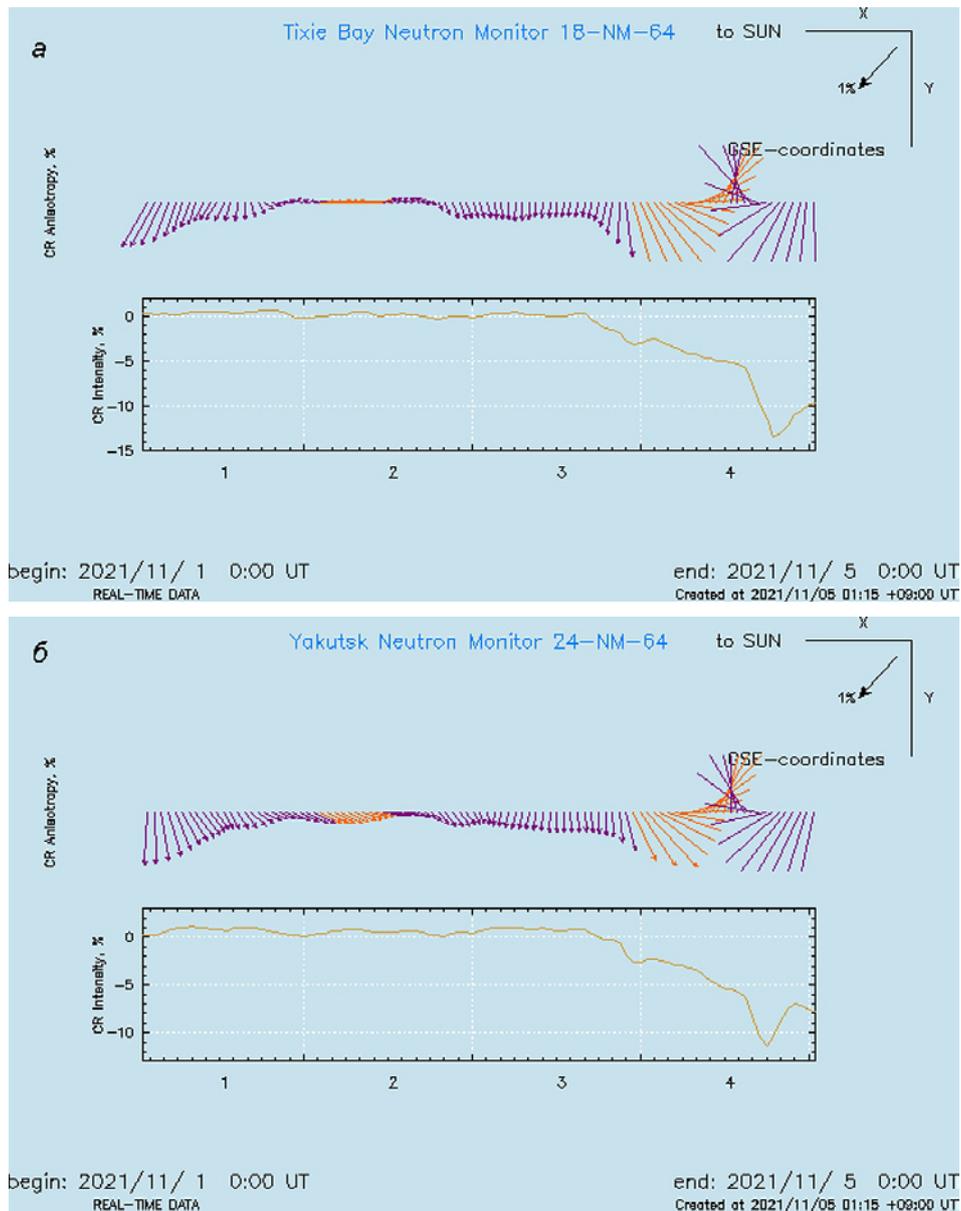


Рис. 3. Результаты прогноза приближения к Земле крупномасштабного возмущения СВ по измерениям нейтронных мониторов на ст. «Тикси» и «Якутск»

перекрывает изотропный в целом поток КЛ между Солнцем и Землей, способствуя приходу частиц на детектор преимущественно с антисолнечного направления, что и служит предвестником приближающегося возмущения межпланетной среды и соответствующего изменения космической погоды. Детальный анализ обстановки в СВ показывает, что в рассматриваемом случае это был классический межпланетный КВМ, который вызвал понижение интенсивности КЛ на Земле и сопровождался сильной магнитной бурей.

Как видно из рис. 3, а, б, указанные выше изменения в параметрах анизотропии КЛ начались еще в начале 2 ноября, а сам форбуш-эффект — более чем через сутки в ~16:00 UT 3 ноября 2021 г. Отметим, что во время самого понижения интенсивности

КЛ Земля находилась в возмущенном СВ за фронтом МУВ, поэтому значения параметров анизотропии существенно искажаются и их не нужно принимать во внимание при анализе события.

## ГЕОМАГНИТНЫЕ ВАРИАЦИИ В НОЯБРЕ 2021 Г., ИХ СВЯЗЬ С МЕЖПЛАНЕТНОЙ ОБСТАНОВКОЙ

На рис. 4 показана динамика геомагнитного индекса  $Dst$  в ноябре 2021 г. [[https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html)]. Видно, что наблюдались большие возмущения геомагнитного поля. В соответствии с классификацией [Loewe, Prolls, 1997] их можно отнести к классу сильных магнитных бурь.

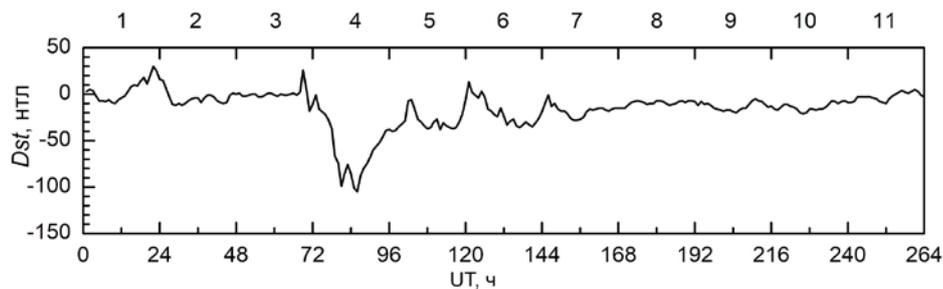


Рис. 4. Вариации  $Dst$  в начале ноября 2021 г. Отсчет времени — с 1 ноября в часах, сверху показаны дни рассматриваемого периода

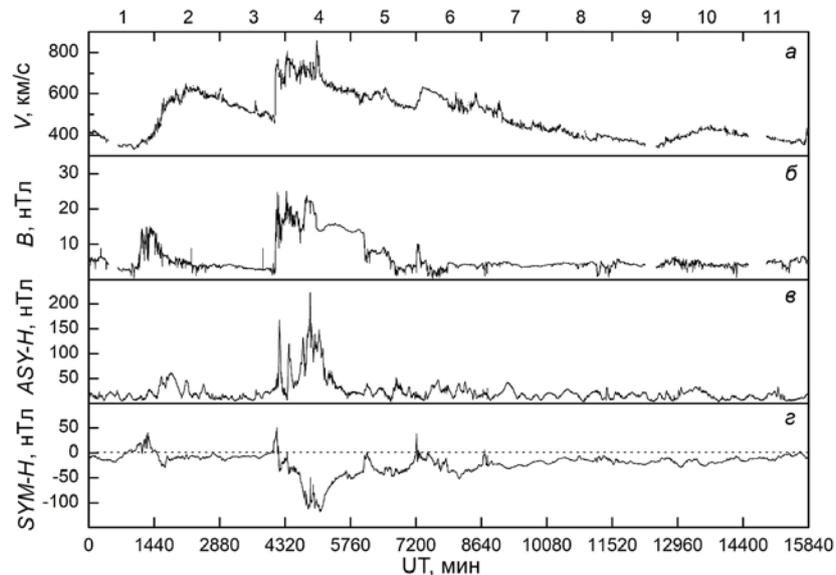


Рис. 5. Скорость СВ  $V$  (а), величина  $B$  ММП (б) и среднеширотные геомагнитные индексы  $ASY-H$  (в) и  $SYM-H$  (г) 1–11 ноября 2021 г. Пунктирная горизонтальная линия — нулевое значение  $SYM-H$ . Отсчет времени здесь и следующих рисунках — с 1 ноября в минутах, сверху показаны дни рассматриваемого периода

На главной фазе магнитной бури среднечасовое значение  $Dst$  по предварительным данным достигло значения  $-105$  нТл. С сентября 2017 г. на Земле зарегистрировано только три бури такого же уровня: 12 мая 2021 г., 14 мая 2019 г., 26 августа 2018 г.

На рис. 5 показаны изменения среднеширотных геомагнитных индексов  $ASY-H$  и  $SYM-H$  ( $SYM-H$  аналогичен  $Dst$ , но имеет 1-минутное временное разрешение), а также скорости СВ  $V$  и величины  $B$  модуля межпланетного магнитного поля (ММП) [https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/]. Магнитная буря, как видно на рис. 5 по данным о геомагнитных индексах, имела внезапное начало 3 ноября в 19:48 UT. Можно предположить, что эта буря стала следствием взаимодействия земной магнитосферы с высокоскоростной структурой в СВ типа КВМ, характеризующейся большим ММП. Отметим, что на предшествующую структуру в СВ с возрастаниями  $V$  и  $B$  1 ноября геомагнитные индексы сильно не отреагировали, изменившись не более чем на 40 нТл ( $SYM-H$ ) и 60 нТл ( $ASY-H$ ).

В начальной и главной фазах бури 3–5 ноября 2021 г. на ст. «Якутск» (исправленные геомагнитные координаты: широта  $\Phi' \approx 56^\circ$  N, долгота  $\Lambda' \approx 201^\circ$  E), «Жиганск» ( $\Phi' \approx 61^\circ$  N,  $\Lambda' \approx 194^\circ$  E) и о-ве Котельный ( $\Phi' \approx 70^\circ$  N,  $\Lambda' \approx 201^\circ$  E) наблюдались сильные воз-

мущения геомагнитного поля. На ст. «Якутск» и «Жиганск» регистрация геомагнитных вариаций производится с помощью феррозондовых магнитометров MAGDAS-9 [Баишев и др., 2017], а на о-ве Котельный — феррозондового магнитометра DCR-3 [Yumoto et al., 1992]. На рис. 6 показаны изменения в эти дни горизонтальной  $H$  и вертикальной  $Z$  составляющих магнитного поля на этих станциях, а также среднеширотных  $ASY-H$  (в) и  $SYM-H$  (г).

Видно, что на о-ве Котельный 3 ноября в 20:10 UT произошло резкое понижение  $H$ -составляющей магнитного поля относительно спокойного уровня на  $\sim 900$  нТл, на ст. «Жиганск» такое же понижение началось в 21:00 UT. Поле на этих станциях восстановилось до спокойного уровня в  $\sim 23:10$  UT. На ст. «Якутск» в это время наблюдались колебательные изменения  $H$ -компоненты с амплитудой до 90–120 нТл и периодом  $\sim 16$ –20 мин. Колебательные изменения  $H$  заметны и на ст. «Жиганск», но они были относительно меньшей амплитуды на фоне большой отрицательной бухты. Что касается  $Z$ -составляющей, то на ст. «Жиганск» она уменьшилась на  $\sim 840$  нТл, (видны заметные колебания), а на ст. «Якутск» — на 180 нТл (с колебаниями небольшой амплитуды). Отрицательные значения  $H$ -,  $Z$ -, а также  $D$ -составляющих магнитного поля указывают на то, что север-

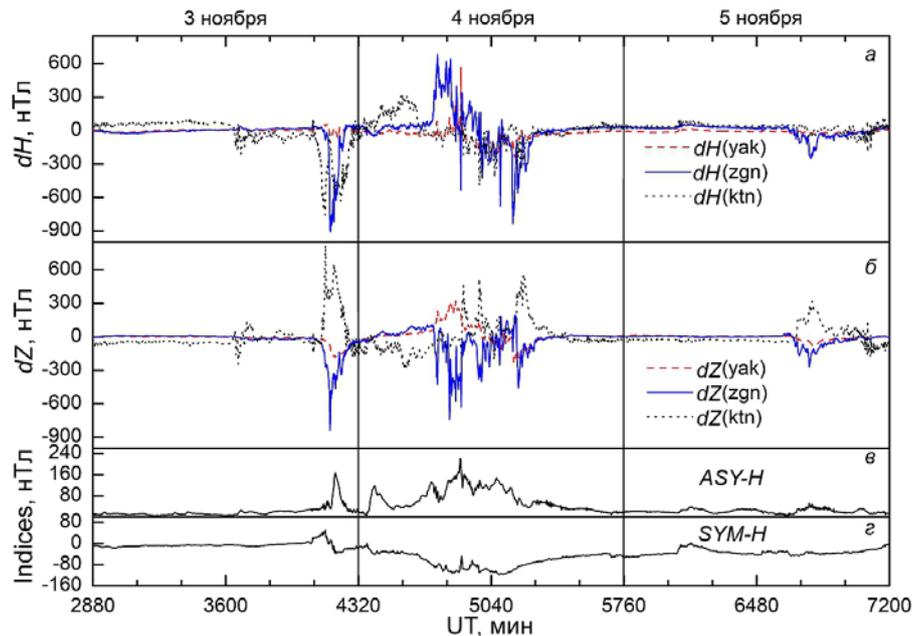


Рис. 6. Горизонтальная  $dH$  (а) и вертикальная  $dZ$  (б) составляющие магнитного поля на ст. «Якутск» (yak), «Жиганск» (zgn) и о-ве Котельный (ktn), а также среднеширотные  $ASY-H$  (в) и  $SYM-H$  (г) 3–5 ноября 2021 г. Сплошные вертикальные линии на этом рисунке и далее соответствуют времени 00:00 UT

нее от ст. «Жиганск» в ионосфере развилась электроструя западного направления, отклоненная относительно широты приблизительно на  $34^\circ$  к северу. Можно предположить, что это возмущение магнитного поля представляет собой изолированную интенсивную суббурию.

По сведениям об авроральных индексах в этот период  $AU > 500$  нТл и  $AL < -1500$  нТл [[https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae\\_realtime/](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_realtime/)]. По данным мировой сети магнитометров SuperMAG [<https://supermag.jhuapl.edu/>] распределение магнитных векторов, полученных по наблюдательным данным и модельным расчетам, соответствует токовым системам DP11 и DP12 [Яхнин, 2008]. На освещенной Солнцем полусфере Земли индексы  $SML$  и  $SMU$ , характеризующие интенсивности западной и восточной электроструй [<https://supermag.jhuapl.edu/>], сравнимы и достигают  $-900$  и  $730$  нТл соответственно, тогда как в теневой полусфере индекс  $SML$  западной электроструи ( $-1500$  нТл) значительно превышает индекс  $SMU$  восточной электроструи ( $520$  нТл). Картина изменений  $H$ -составляющих магнитного поля на о-ве Котельный и на ст. «Жиганск» и «Якутск», находящихся во время развития суббури в утреннем секторе, вполне укладывается в распределение расчетных магнитных векторов мировой сети SuperMAG как часть токовой системы DP11. На рис. 7, а показано распределение горизонтальных магнитных векторов, рассчитанных по данным проекта AMPERE [<https://ampere.jhuapl.edu/>] для иллюстрации направления ионосферного эквивалентного тока в период 21:04–21:14 UT. В утреннем секторе на широтах  $65^\circ < \Phi < 69^\circ$  можно идентифицировать авроральную западную электрострую. На рис. 7, б показано распре-

деление продольных токов по данным AMPERE [<https://ampere.jhuapl.edu/>]. Видно, что в утреннем секторе продольные токи втекают в ионосферу на широтах  $\sim 68^\circ$ – $72^\circ$  N и вытекают на широтах  $\sim 64^\circ$ – $66^\circ$  N. Из этого можно заключить, что центр тяжести западной электроструи находится на широте  $\sim 67^\circ$  N.

По данным о среднеширотных  $ASY-H$  и  $SYM-H$ , приведенным на рис. 5, в, г, видно, что в  $\sim 19:48$  UT произошел заметный скачок  $SYM-H$  на 20 нТл в область положительных значений, которые сохранились до 21:17 UT, достигая 50 нТл в 20:57–21:00 UT. После этого в  $\sim 21:34$  UT началось резкое возрастание  $ASY-H$  и понижение  $SYM-H$ . Можно предположить, что в рассматриваемый период в магнитосфере резко усилились токи магнитопаузы и хвоста, а также развилась интенсивная асимметричная компонента кольцевого тока, более чем в четыре раза превышающая симметричную компоненту кольцевого тока (167 и  $-37$  нТл соответственно).

Четвертого ноября в первые часы по UT ( $\sim 09$ – $15$  LT) на о-ве Котельный наблюдался эффект восточной электроструи, расположенной южнее этой станции. Об этом свидетельствуют положительная бухта в  $dH(ktn)$  и отрицательная бухта в  $dZ(ktn)$  (см. рис. 6). В этот период времени на ст. «Жиганск» и «Якутск» магнитные вариации отсутствовали. Спустя  $\sim 8$  ч после описанной выше изолированной интенсивной суббури началось следующее возмущение магнитного поля на ст. «Якутск» и «Жиганск». В  $H$ -составляющей магнитного поля начиная с 06:50 UT на обеих станциях видно последовательное развитие положительной ( $dH(yak) \sim 100$  нТл,  $dH(zgn) \sim 500$  нТл) и отрицательной бухт ( $dH(yak) \sim -200$  нТл,  $dH(zgn) \sim -400$  нТл) с наложением на них

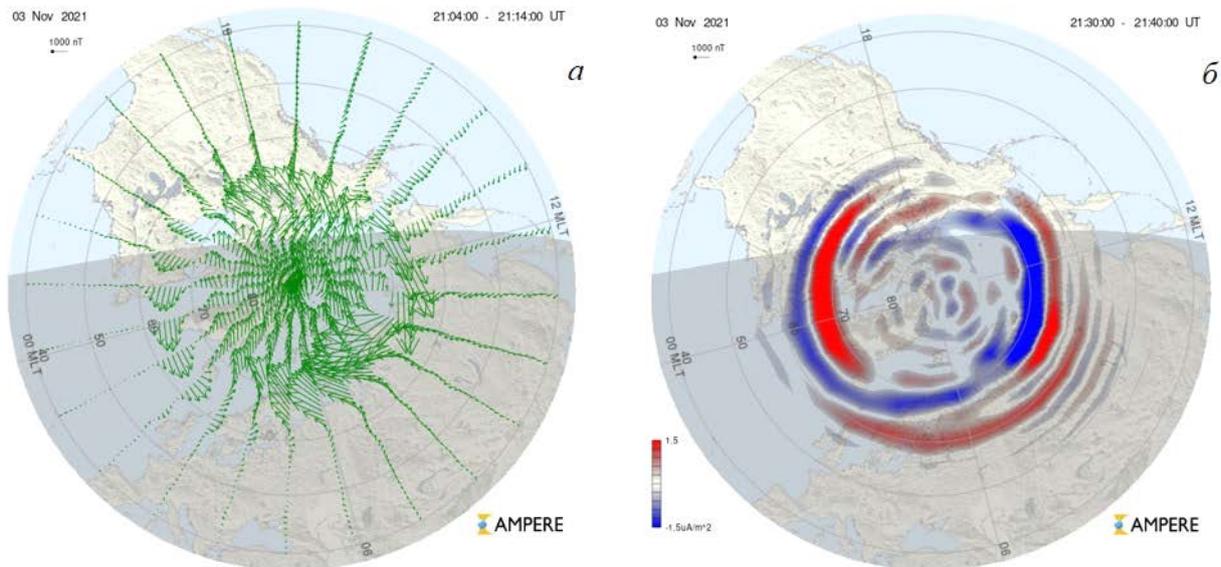


Рис. 7. Распределение горизонтальных магнитных векторов, повернутых на  $90^\circ$  по часовой стрелке (а), на ионосферных высотах и продольных токов (б) 3 ноября 2021 г. в 21:04–21:14 UT (расчеты проекта AMPERE)

колебаний с периодом до нескольких десятков минут и амплитудой до 200 нТл. В Z-составляющей поля на ст. «Якутск» заметна смена положительной бухты с  $dZ(\text{yak}) \sim 300$  нТл на отрицательную бухту с  $dZ(\text{yak}) \sim -200$  нТл, а на ст. «Жиганск», наоборот, отрицательной бухты с  $dZ(\text{zgn}) \sim -450$  нТл на положительную с  $dZ(\text{zgn}) \sim 100$  нТл. Видно также наложение на бухты колебаний магнитного поля. На о-ве Котельный вариации  $dH(\text{ktn})$  подобны вариациям на ст. «Жиганск», однако вариации  $dZ(\text{ktn})$  противоположны. Возмущение завершилось около 18 UT, общая продолжительность возмущения составила  $\sim 11$  ч. Поместному времени возмущение происходило в послеполуденные, вечерние и ночные часы с  $\sim 16:00$  до 03:00 LT следующего дня.

Авроральные индексы в этот день по данным [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae\_realtime/] достигали значений  $AU \sim 500$ ,  $AL \sim -2000$  нТл. На освещенной Солнцем полусфере Земли  $SML$  и  $SMU$  сравнимы и в отдельные моменты времени достигают значений  $\pm 650$  нТл [https://supermag.jhuapl.edu/], тогда как в теневой полусфере  $SML$  западной электроструи ( $-2800$  нТл) значительно превышает  $SMU$  восточной электроструи (400 нТл). Картина изменений  $H$ -составляющих магнитного поля на якутских станциях, располагавшихся во время развития суббури в вечернем и ночном секторах, соответствует распределению магнитных векторов мировой сети SuperMAG как результат наложения токовых систем DP2 и DP1 [Яхнин, 2008]. Восточная электроструя имела место в послеполуденном и вечернем секторах, судя по знакам отклонений  $dH$  и  $dZ$ , на широте  $56^\circ < \Phi' < 61^\circ$ . В поздние вечерние и ночные часы ст. «Жиганск» и «Якутск» находились под сложной системой токов западного и восточного направлений. На рис. 8, подобно рис. 7, приведены распределение горизонтальных магнитных векторов для иллюстрации направления ионосферных эквивалентных

токов и распределение продольных токов по данным проекта AMPERE [https://ampere.jhuapl.edu/] в вечернем секторе. Можно полагать, что в вечернем секторе на отмеченных широтах действительно наблюдаются токи восточного направления (панель а), продольные токи втекают в ионосферу на широтах  $\Phi' \sim 57^\circ - 60^\circ$  и вытекают из ионосферы на широтах  $\Phi' \sim 62^\circ - 65^\circ$  (панель б). Исходя из картины продольных токов можно предположить, что центр тяжести восточной электроструи располагается на широте  $\Phi' \sim 58^\circ$ .

Индексы  $ASY-H$  и  $SYM-H$  (см. рис. 5, в, з) испытывают изменения, свидетельствующие о дальнейшем развитии начальной фазы магнитной бури. Изменения начались 4 ноября в  $\sim 00:45$  UT: произошли скачок  $ASY-H$  в положительную сторону с 8 до 119 нТл и отрицательное понижение  $SYM-H$  от нуля до  $-42$  нТл в 01:27 UT. Далее наблюдались спад  $ASY-H$  до значения 40 нТл и возрастание  $SYM-H$  до  $-33$  нТл в 02:47 UT. Отмеченные изменения индексов проявились в  $H$ -составляющей поля на ст. «Якутск» и «Жиганск» в виде небольших отрицательных бухт с величиной отклонения  $\sim 46$  и  $\sim 60$  нТл, на о-ве Котельный в это время начала развиваться положительная бухта в  $dH(\text{ktn})$  и отрицательная бухта в  $dZ(\text{ktn})$ .

На основании вариаций индекса кольцевого тока  $SMR$ , рассчитываемого по данным сети SuperMAG [https://supermag.jhuapl.edu/], можно заключить, что главная фаза бури началась в  $\sim 05:25$  UT и продолжалась до 08:37 UT, т. е. ее длительность составила  $\sim 192$  мин. Восстановительная фаза бури продолжалась до 11 ноября, сопровождаемая развитием ряда суббурь 5, 6, 8–10 ноября интенсивностью авроральных индексов  $AU < 200$  нТл и  $AL > -400 \div -700$  нТл.

Событие, происшедшее 3 ноября и определенное как изолированная интенсивная суббуря, вероятно, является элементом начальной фазы описанной здесь бури. Это можно предположить по данным о  $Dst$  [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\_provisional/index.html] и вариациях параметров СВ. На рис. 9, 10 показаны

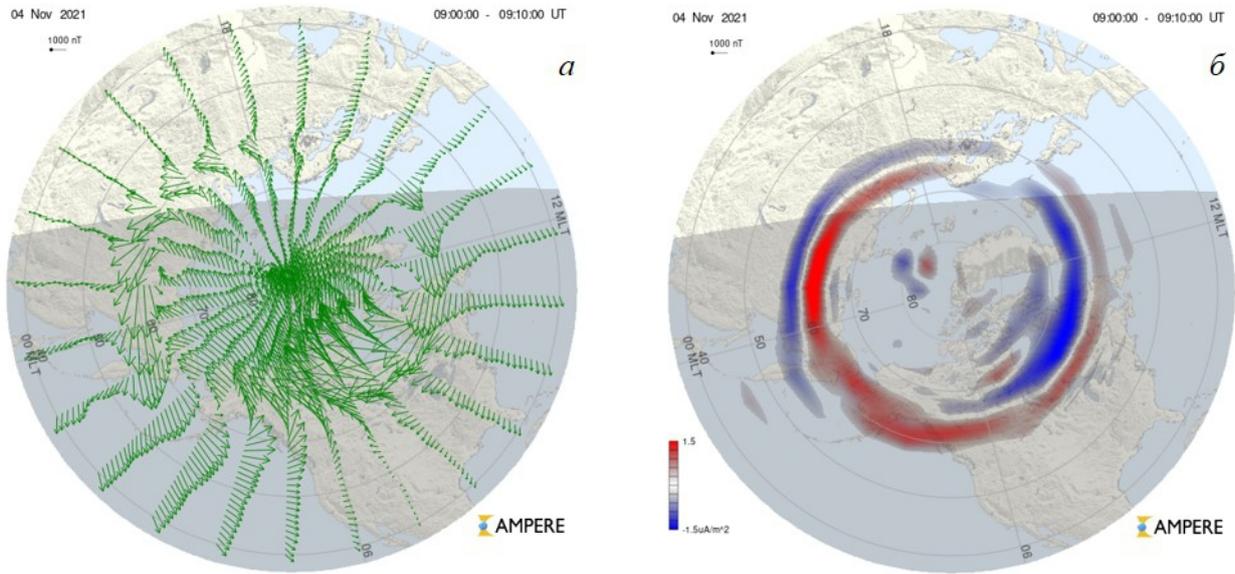


Рис. 8. Распределение горизонтальных магнитных векторов, повернутых на  $90^\circ$  по часовой стрелке (а), на ионосферных высотах и продольных токов (б) в вечернем секторе 4 ноября 2021 г. (расчеты проекта AMPERE)

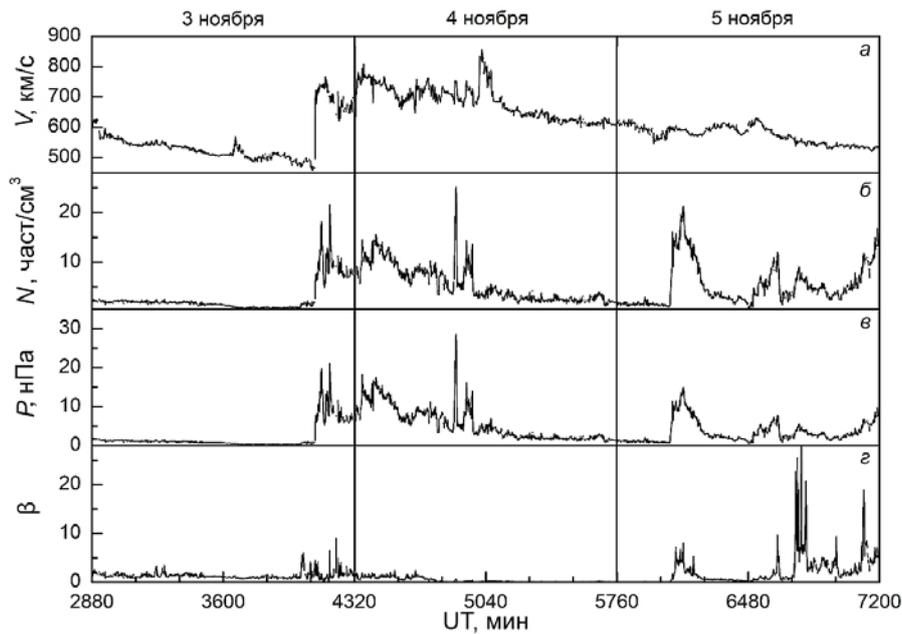


Рис. 9. Изменения параметров солнечного ветра 3–5 ноября 2021 г.: скорости  $V$  (а), плотности протонов  $N$  (б), динамического давления  $P$  (в), параметра  $\beta$  — отношения теплового давления к магнитному (г)

изменения параметров межпланетной среды в рассмотренные дни.

Как следует из рис. 10, буря произошла на фоне положительного сектора ММП. Изменения в СВ и ММП длились с 19:00 UT 3 ноября до 10 ноября. Сначала они наблюдались в параметре солнечной плазмы  $\beta$ , характеризующем отношение теплового давления к магнитному, — видно его резкое увеличение от 1 до 5.9 в течение 15 мин (см. рис. 9). Отметим [Куражковская и др., 2021], что  $\beta$  является одним из важных факторов, влияющих на интенсивность бури, — чем меньше  $\beta$  на главной фазе бури, тем

больше ее интенсивность. Такая закономерность проявилась и в рассматриваемой буре: максимальное понижение  $SMR$  составило  $\sim 130$  нТл. В параметрах ММП заметны небольшое уменьшение  $B$  с 2.6 до 1.5 нТл при нулевой северо-южной компоненте ММП, а также понижения и радиальной  $B_x$  от  $-1$  до 0 азимутальной компоненты  $B_y$  от 2 до 1.4 нТл (см. рис. 10).

Резкий рост динамического давления  $P$  до  $\sim 7$  нПа произошел спустя  $\sim 5$  мин после начала сильных изменений в параметре  $\beta$ . Одновременно возросли скорость СВ до  $\sim 700$  км/с, плотность до  $\sim 7$  см $^{-3}$ , ММП

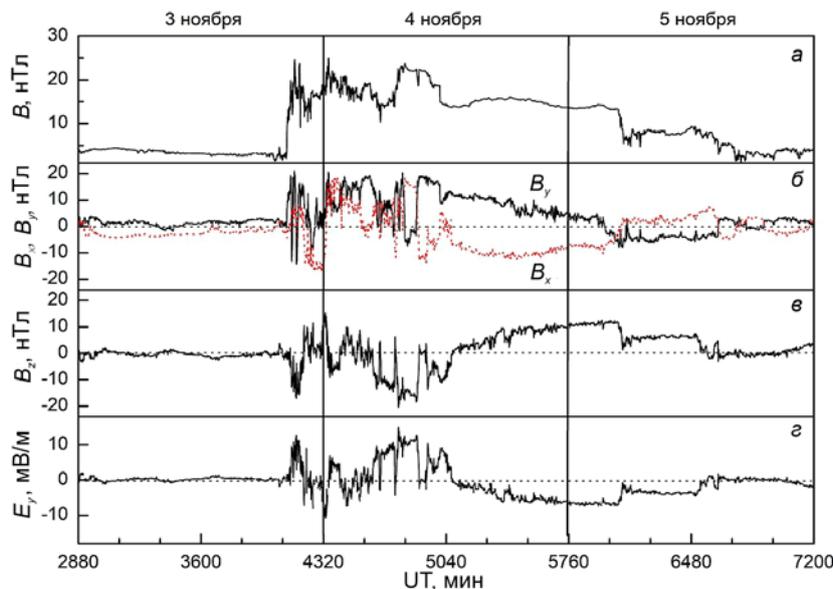


Рис. 10. Изменения  $V$  ММП (а), его радиальной  $B_x$ - и азимутальной  $B_y$ -компонент (б), северо-южной компоненты  $V_z$  (в) и азимутального электрического поля СВ  $E_y$  (г) 3–5 ноября 2021 г.

до  $\sim 12$  нТл и начались сильные колебания  $B_y$ - и  $B_x$ -компонент ММП,  $B_z$ -компонента изменила направление на юг через 19 мин после резкого роста  $P$ . Тогда же произошел резкий рост азимутального электрического поля СВ  $E_y = -VB_z$  от нуля в положительную сторону до  $\sim 10$  мВ/м и больше.

В период возмущений межпланетных параметров наблюдалось нарушение секторной структуры ММП в течение  $\sim 15$  ч. За это время  $V$  увеличилась с  $\sim 500$  до  $\sim 700$  км/с, достигнув во время возмущений  $\sim 800$  км/с и выше, а после возмущений значение скорости  $\sim 650$  км/с держалось практически неизменным более 12 ч. Модуль ММП до возмущений был постоянным и составлял 3 нТл, затем резко возрос до 12 нТл, во время возмущений достигал  $\sim 25$  нТл, а после них более 12 ч держался на уровне  $\sim 14$  нТл.

Магнитосфера на резкие возрастания плотности протонов  $N$ , динамического давления  $P$  и параметра  $\beta$ , имевших место 5 ноября сильно не отреагировала, что проявилось в слабых изменениях  $ASY-H$  и  $SUM-H$ , горизонтальной  $H$ - на ст. «Якутск» и «Жиганск» (см. рис. 6), а также авроральных индексов. Такая реакция магнитосферы, возможно, объясняется ориентацией ММП в это время в северном направлении, но это требует отдельного рассмотрения.

### ВАРИАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ НА СТ. «ЯКУТСК» И ИХ СВЯЗЬ С ВОЗМУЩЕНИЯМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Представляет интерес проведение сравнительного анализа параметров составляющих магнитного поля и электрических потенциалов во время исследуемой магнитной бури. Рассмотрим более подробно поведение естественных потенциалов 3–4 ноября 2021 г. Вариации одночасовых значений  $Dst$  во время этой

бури показаны на рис. 4. Вариации  $X$ - и  $Y$ -компонент зарегистрированы на геофизическом приборе ADU-07, установленном на радиофизическом полигоне «Ойбенкель». Вариации естественных потенциалов  $E$  измерены на том же приборе с помещенными в грунт неполяризуемыми электродами с разносом на 100 м [Козлов и др., 2022].

Коэффициент корреляции между разностью естественных потенциалов  $E_{CЮ}$ ,  $E_{ВЗ}$  (север—юг, восток—запад) и соответствующими магнитными составляющими  $X$  и  $Y$  в 08:30–10:30 составляет  $\rho(E_{CЮ}, B_y) = 0.69 \pm 0.1$  ( $p < 0.005$ ) и  $\rho(E_{ВЗ}, B_x) = 0.88 \pm 0.1$  ( $p < 0.005$ ). Диапазон изменения  $\rho = 0.5 \div 0.9$ . Связь между вариациями естественных потенциалов  $E_{ВЗ}$  и вызвавшими их вариациями магнитной составляющей  $B_x$  может быть выражена как  $E_{ВЗ} = 0.05B_x - 16$ , где  $E$  измеряется в мВ, а  $B$  — в относительных единицах прибора ADU-07. При этом надо учесть, что смещение в выражении, получаемое при  $B_x = 0$ , во время бури меняется от  $-12$  до  $-22$  из-за наличия медленных компонент вариаций, на которые накладываются вариации, вызванные более быстрыми пульсациями. Соответственно для  $E_{CЮ}$  и  $B_y$  получаем соотношение  $E_{CЮ} = 0.06B_y - 10$  при изменении смещения от  $-6$  до  $-18$ .

Сравним измеренные вариации естественных потенциалов во время магнитных бурь в моменты максимального протаивания сезонно-талого слоя 7–8 сентября 2017 г. и во время бури 3–4 ноября 2021 г., когда верхний слой уже месяц, как начал промерзать сверху, но весь талый слой еще не промерз.

Во время двухступенчатой очень сильной бури уровня G4 7–8 сентября 2017 г. наблюдались высокоширотные геомагнитные вариации, сопровождаемые возбуждением всплесков (волновых пакетов) геомагнитных пульсаций Pc5. Во время первой ступени  $Dst$  достигал  $-142$  нТл, а во время второй ступени —  $-124$  нТл. Коэффициент корреляции между разностью естественных потенциалов  $E_{CЮ}$ ,  $E_{ВЗ}$  и соответствующими магнитными составляющими  $X$  и  $Y$  во время

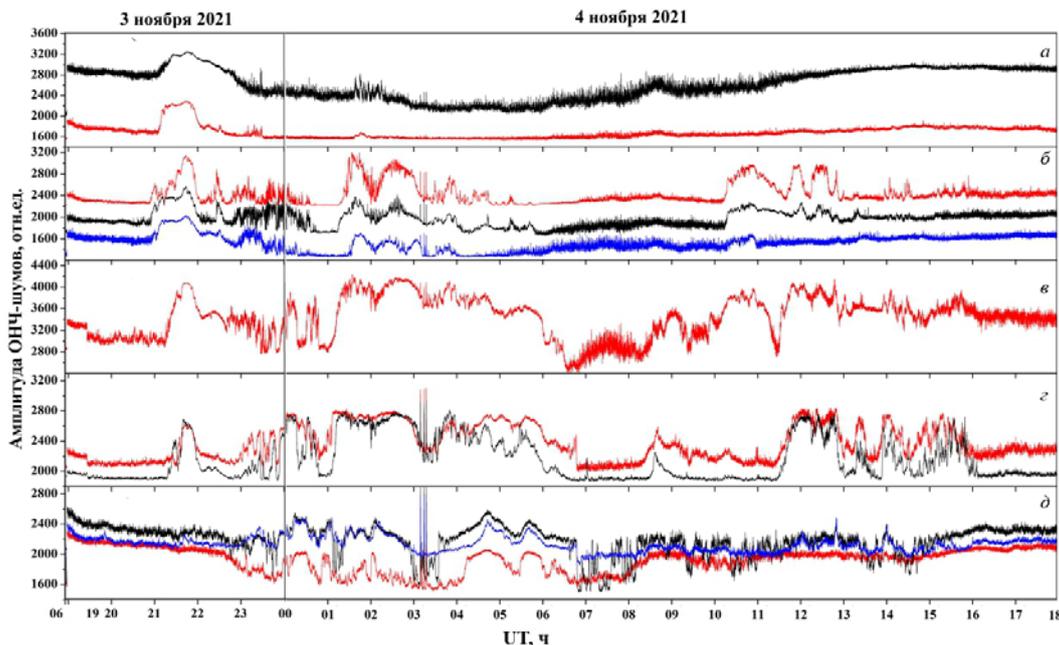


Рис. 11. Вариации амплитуды ОНЧ-шумов, принимаемые 3–4 ноября 2021 г. ориентированной в направлении восток — запад магнитной рамкой: черный цвет — 8.7 кГц, красный — 6.7 кГц (а); синий — 5.6 кГц, черный — 4.0 кГц, красный — 3.1 кГц (б); красный — 2.2 кГц (в); черный — 1.6 кГц, красный — 1.1 кГц (г); синий — 0.8 кГц, черный — 0.6 кГц, красный — 0,4 кГц (д)

пульсаций, длящихся 8.33 ч, составляет  $\rho(E_{\text{СЮ}}, B_y) = 0.77 \pm 0.1$  ( $p < 0.005$ ) и  $\rho(E_{\text{ВЗ}}, B_x) = 0.65 \pm 0.1$  ( $p < 0.005$ ),  $\rho = 0.5 \div 0.9$ . Зависимость  $E_{\text{СЮ}}$  (мВ/100 м) от величины магнитного поля (отн. ед. ADU-07e) во время пульсаций первого всплеска (интервал 5600–5700 с от начала суток 8 сентября 2017 г.) можно выразить как  $E_{\text{СЮ}} = 0.0002B_y - 22$ , во время пульсаций второго всплеска (интервал 40000–70000 с от начала суток 8 сентября 2017 г.) — как  $E_{\text{СЮ}} = 0.0002B_y - 24$ .

Во время полного промерзания верхнего слоя, оттаивающего летом (буря 26 января 2021 г.), также наблюдались высокоширотные геомагнитные вариации, сопровождаемые возбуждением всплесков (волновых пакетов) геомагнитных пульсаций Pc5. Это была слабая буря уровня G1. Во время бури  $Dst$  достигал 39 нТл. Коэффициент корреляции между  $E_{\text{СЮ}}$ ,  $E_{\text{ВЗ}}$  и  $B_x$ ,  $B_y$  во время пульсаций составляет  $\rho(E_{\text{СЮ}}, B_y) = 0.61 \pm 0.1$  ( $p < 0.005$ ) и  $\rho(E_{\text{ВЗ}}, B_x) = 0.62 \pm 0.1$  ( $p < 0.005$ ). Зависимость  $E_{\text{СЮ}}$  (мВ/100 м) от величины магнитного поля (отн. ед. ADU-07e) во время пульсаций 16:50–17:00 UT можно выразить как  $E_{\text{СЮ}} = 0.0013B_y - 27$ , а 17:20–17:40 UT — как  $E_{\text{СЮ}} = 0.0016B_y - 28$ .

Таким образом, из сравнения параметров составляющих магнитного поля и электрических потенциалов во время приведенных трех магнитных бурь, наблюдаемых в разные сезоны года (при максимальном протаивании активного слоя грунта в сентябре, при полном промерзании активного слоя в конце января и в начале ноября, когда верхняя часть активного слоя начинает промерзать), можно сделать вывод, что при полном промерзании грунта наблюдается более крутая зависимость, чем при макси-

мальном протаивании верхней части грунта. Коэффициент наклона линейной зависимости в восемь раз больше. Коэффициенты зависимости, наблюдаемой в начале ноября 2021 г. ближе к зимним значениям. Изменение коэффициентов зависимости связано с изменением проводимости активного слоя грунта.

## ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ В ВАРИАЦИЯХ АМПЛИТУДЫ ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведенные в ноябре 2021 г. на радиофизическом полигоне «Ойбенкель» наблюдения вариаций амплитуды ОНЧ-излучения позволили выявить большое многообразие типов непрерывных и дискретных естественных радиошумов в диапазоне 1.0–7.0 кГц. Магнитные и электрические компоненты ОНЧ-излучения регистрируются на радиофизическом полигоне «Ойбенкель», который находится на удалении 25 км от мест промышленных помех в районе Якутска и более 5 км от ближайшей ЛЭП.

В работе использованы данные с временным разрешением 1 с ОНЧ-шумов, принимаемых ориентированной в направлении восток—запад магнитной рамкой, усиленные в приемнике-регистраторе, на 11 полосовых фильтрах с 0.4 до 8.7 кГц и преобразованные с помощью аналого-цифрового устройства для записи в память регистратора [Мурзаева и др., 2001]. Используются также данные регистрации ОНЧ-излучения в диапазоне до 20 кГц, принимаемого вертикальным электрическим несимметричным диполем.

Динамические вариации ОНЧ-шумов, принимаемых ориентированной в направлении восток—запад

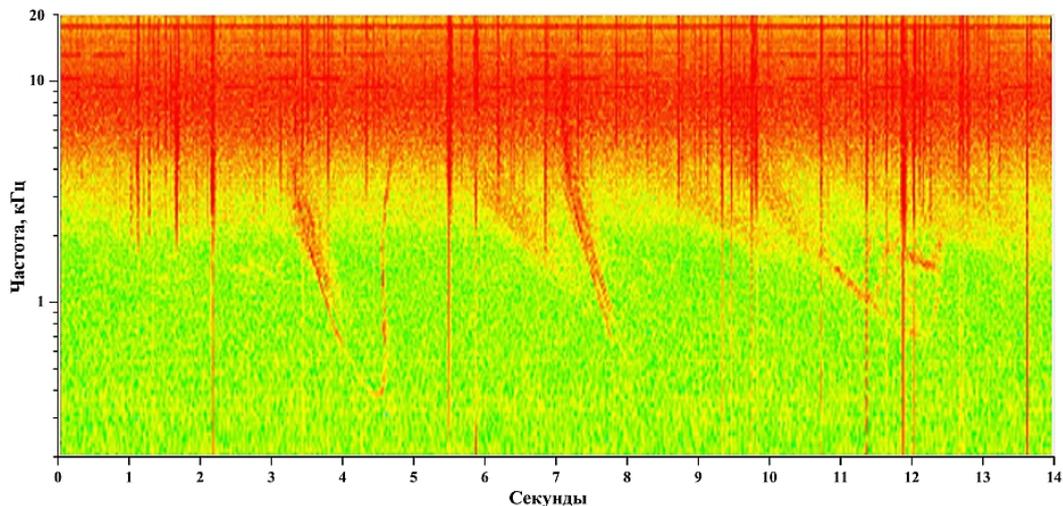


Рис. 12. Динамические спектры в диапазоне до 20.0 кГц в 23:00:00–23:00:14 UT 3 ноября 2021 г.: свистящие атмосферерики, стимулирующие триггерное излучение

магнитной рамкой во время бури 3–4 ноября 2021 г., показаны на рис. 11, соответствующие им динамические спектры в диапазоне до 20 кГц, принимаемые вертикальным электрическим несимметричным диполем показаны на рис. 12–15.

На земной поверхности всплески хоров и широкополосных шипений, как правило, наблюдаются во время развития магнитосферных суббурь, ОНЧ шумовые бури — во время магнитных бурь, а квазипериодические ОНЧ-излучения — в спокойных геомагнитных условиях [Маннинен и др., 2020]. Для рассматриваемой магнитной бури 3–4 ноября 2021 г. наблюдаются как всплески хоров, так и различные квазипериодические излучения, широкополосные и квазипериодические шипения, различные стимулированные дискретные и узкополосные сигналы. При рассмотрении вариаций ОНЧ-излучения за этот период была выявлена следующая хронология событий с проявлением непрерывных и дискретных излучений различных типов:

1. Возмущения ОНЧ-излучения начались со всплеска широкополосного шипения в 20:55:55 UT (см. рис. 11). В первое время наблюдались шипения на частотах 3.4–5.3 кГц, затем частотный диапазон расширился до 3.0–5.7 кГц. С постепенным увеличением интенсивности шипений увеличилась верхняя граница диапазона до 9 кГц в 21:20 UT. Затем в 21:40 UT шипения имели максимальную интенсивность в диапазоне 1.0–13.5 кГц. В 22:00 UT шипения начали ослабевать, диапазон стал 2.0–6.0 кГц и в конце часа шипения резко прекратились. Эти непрерывные шипения в различных частотных диапазонах за время с ~21 до 23 UT проявлялись в ОНЧ-излучении, когда  $B_z$ -компонента ММП начала менять направления с юга на север (с минимальных отрицательных до максимальных положительных значений).

2. Приблизительно с 22:30 3 ноября до 02:00 UT 4 ноября 2021 г. в ОНЧ-излучении были зарегистрированы хоры (дискретные элементы длительностью 0.1–0.3 с с повышающейся частотой). Частотный диапазон хоров менялся с 1.5–8.0 кГц до 3.0–5.0 кГц.

При этом наблюдались квазипериодические структуры длительностью 2–3 с с хоровыми элементами, которые продолжались с 23:00 3 ноября до 01:20 UT 4 ноября 2021 г. В этот же отрезок времени были зарегистрированы свистящие атмосферерики (вистлеры), которые стимулировали короткие дискретные сигналы (см. рис. 12).

3. За период 01:00–03:00 UT 4 ноября 2021 г. были зарегистрированы ОНЧ-излучения различных типов. Во-первых, шипения 0.7–4.5 кГц с максимумом интенсивности в двух полосах на частотах 1.3–3.2 и 3.5–5.0 кГц (см. рис. 13). В это время  $B_z$ -компонента ММП, так же как для периода времени 21:00–23:00 UT 3 ноября 2021 г., изменялась с минимума отрицательных значений до положительных. Кроме того, наблюдались узкополосные шипения на частотах 2.3–2.8, 2.6, 2.5–3.0, 2.0–5.0 кГц, которые сопровождалась стимулированием дискретных триггерных сигналов и хоров (встроенная панель на рис. 13). В это же время на фоне непрерывного шипения наблюдались стимулированные вистлерами квазипериодические шипения с периодом 2–3 с на частотах 3.5–4.5 и 3.2–5.0 кГц (см. рис. 15). Продолжительность проявления этих квазипериодических шипений достигала почти 2 мин. В то же время наблюдаются хоры на частотах 2.3–5.0, 2.0–4.5 и 1.5–5.0 кГц. Начиная с 02:15 по 02:50 UT были зарегистрированы QR-шипения с возрастанием частот в диапазоне 1.6–4.3 кГц с периодами 80–100 с (см. рис. 14). В это время  $B_z$ -компонента ММП имела положительные значения. Следует также отметить, что в 03:40–04:00 UT было зарегистрировано шипение на частотах 1.3–2.7 кГц и наблюдались хоры.

4. Во всем рассматриваемом временном интервале наблюдалось слабое плазмосферное шипение на частотах 0.6–3.0 кГц с периодическими небольшими увеличением и уменьшением интенсивности с максимумом в 04:00–09:00 UT 4 ноября 2021 г., когда не регистрировались ОНЧ-излучения других типов.

5. Начиная с 10:10 до 11:40 UT 4 ноября 2021 г. наблюдалось широкополосное шипение на различных

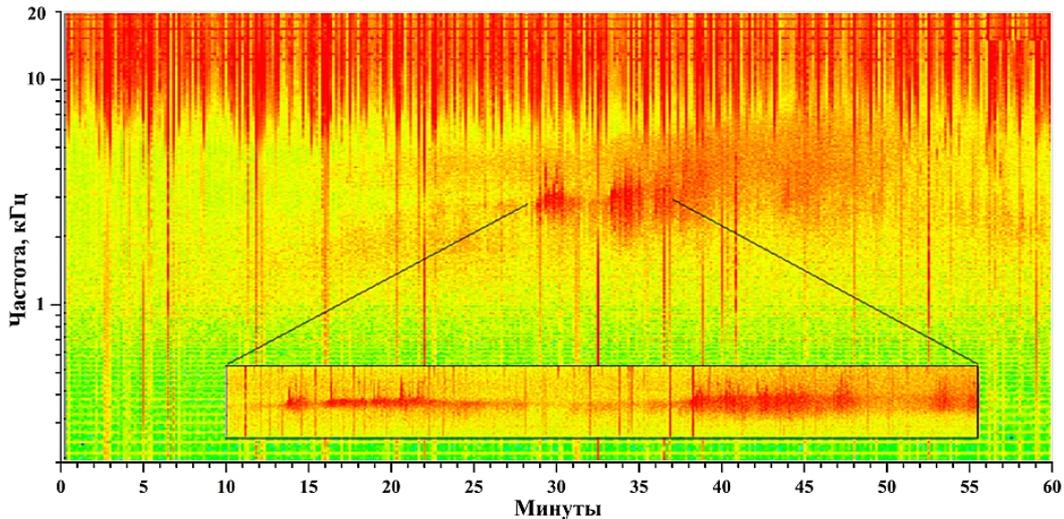


Рис. 13. Динамический спектр ОНЧ-излучения в диапазоне до 20.0 кГц в 01:00 UT 4 ноября 2021 г. На встроенной панели показано узкополосное шипение на частотах 2.5–3.5 кГц, стимулирующее триггерные сигналы и хоры

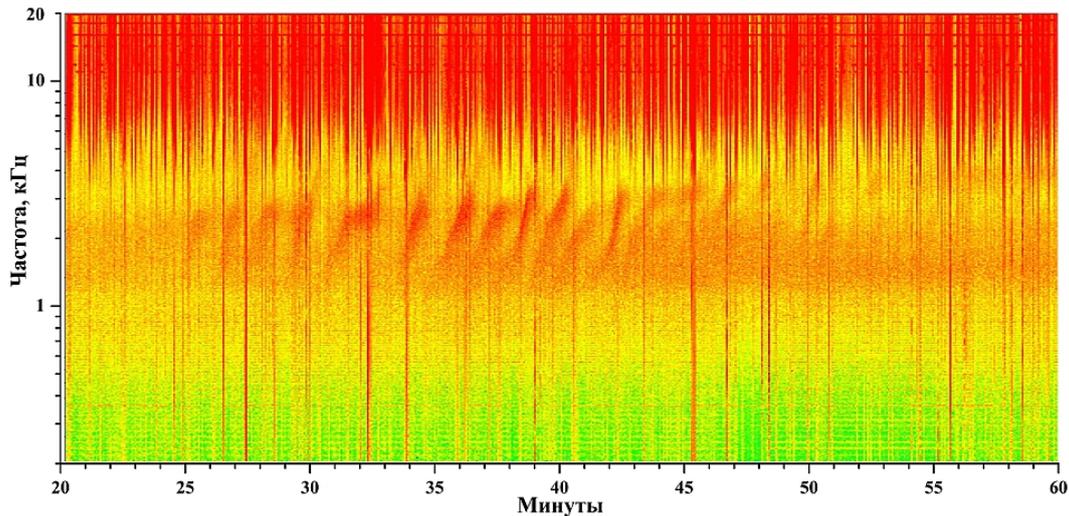


Рис. 14. QR-шипение на частотах 1.5–5.0 кГц в 02:00–03:00 UT 4 ноября 2021 г. На шкале времени отмечены минуты от начала часа

частотах в диапазоне 2.2–5.0 кГц с максимумом интенсивности в 10:50 UT в диапазоне 2.2–4.8 кГц. В этот период отмечалась  $B_z > 0$ , причем расширение частотного диапазона и его последующее сужение связано с изменением от  $B_z < 0$  к  $B_z > 0$ , и обратно. Были зарегистрированы также широкополосные шипения 3.0–5.2 кГц начиная с 11:50 до 12:50 UT. В этот период  $B_z$  меняла свои значения от отрицательных до положительных. Эти шипения сопровождалось стимулированными вистлерами квазипериодическими излучениями 3.0–5.0 кГц (см. рис. 15). В 12:00 UT 4 ноября были зарегистрированы интенсивные непрерывные хоры на 1.0–1.5, 1.7–2.7, 3.2–4.4, 1.4–4.4, 0.9–3.5 кГц. Кроме того, наблюдались узкополосные шипения с периодом 3 с на 4.4 кГц, а также квазипериодические структуры длительностью 2–3 с с хоровыми элементами на частотах 1.9–2.9 и 0.8–1.4 кГц, которые продолжались с 12:10 по 13:10 UT.

6. Начиная с 13:10 UT возмущения в ОНЧ-излучении ослабли. Наиболее заметными событиями в это время были хоры и узкополосные шипения на 5.5 кГц, которые были стимулированы вистлерами с 13:50 по 14:10 UT. В 15:20–16:00 UT наблюдались интенсивные узкополосные шипения с периодом 2–4 с на 1.0–4.0 кГц, которые сопровождалось хоровыми элементами. После 16:00 UT интенсивность ОНЧ-излучения восстановилась до уровня, соответствующего наблюдаемому перед началом бури.

Таким образом, в ряду основных событий можно выделить наблюдаемые непрерывные и квазипериодические широкополосные шипения, связанные с изменением направления  $B_z$  ММП:

- Широкополосные шипения с изменением нижней и верхней частот и интенсивности ОНЧ-излучения, которые соответствуют изменениям значений и направления  $B_z$  по отношению к магнитному полю

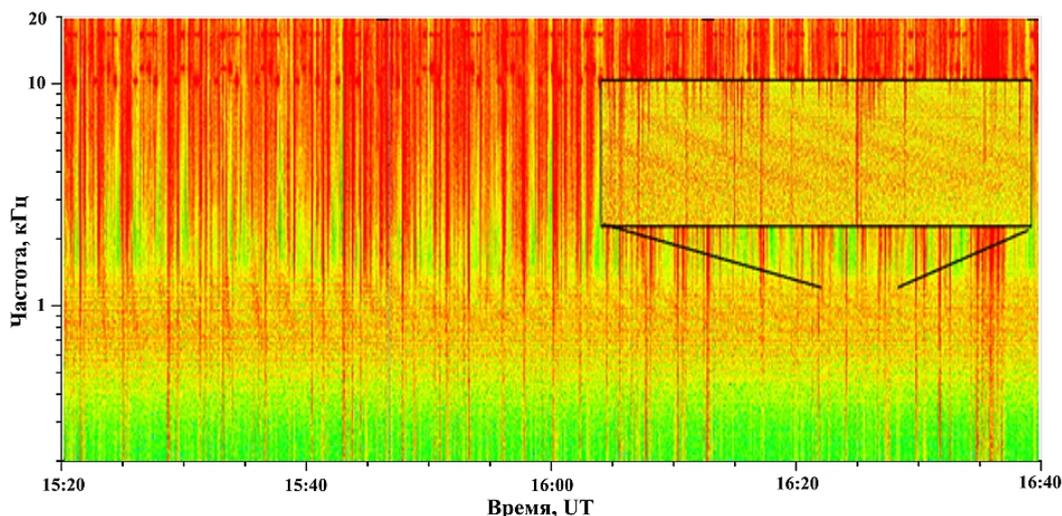


Рис. 15. Стимулированные вистлерами квазипериодические излучения на фоне шипения на частотах 3.0–5.0 кГц 4 ноября 2021 г.

Земли с южной на северную (от отрицательных значений к положительным). Такие широкополосные шипения были зарегистрированы: в диапазонах 1.0–13.5 кГц в 21:00–23:00 UT 3 ноября, 0.7–4.5 кГц в 01:00–03:00 UT 4 ноября и 3.0–5.2 кГц в 12:00–13:00 UT 4 ноября.

- Широкополосное шипение 2.2–5.0 кГц в 10:10–11:40 UT 4 ноября. В это время  $B_z > 0$ , причем расширение частотного диапазона и его последующее сужение связано с изменением от  $B_z < 0$  к  $B_z > 0$ , и обратно.

- QR-шипения в 02:15–02:50 UT 4 ноября 2021 г. с возрастанием частот в диапазоне 1.6–4.3 кГц с периодами 80–100 с;  $B_z > 0$ .

### ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В ВАРИАЦИЯХ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ СИГНАЛОВ ОНЧ-РАДИОСТАНЦИЙ

На ст. «Якутск» (62.02° N, 129.70° E) и на территории полярной геофизической обсерватории (ПГО) «Тикси» (71.6° N, 128.9° E) проводится регистрация диапазона очень низких частот (ОНЧ 3–30 кГц).

Повышение потока рентгеновского излучения во время солнечных вспышек приводит к резкому повышению концентрации электронов в ионосфере. Это вызывает внезапные фазовые и амплитудные аномалии (ВФА, ВАА) при распространении электромагнитных ОНЧ- и НЧ-сигналов. Уменьшение фазовой задержки ОНЧ-радиосигнала при ВФА можно трактовать как уменьшение эффективной высоты волновода Земля — нижняя ионосфера, а понижение затухания радиоволн (повышение амплитуды регистрируемого сигнала) при ВАА при распространении в волноводе — как понижение высотного градиента концентрации электронов нижней ионосферы [Kumar, Kumar, 2018].

В суточных вариациях амплитуды и фазы радиосигналов передатчиков NAA (США, 44.65° N, 67.28° W, частота сигнала 24.0 кГц), NWC (Австралия, 21.82° S, 114.17° E, 19.8 кГц), Хабаровск (РСДН-20, 11.904 кГц)

при регистрации на ст. «Якутск» и «Тикси» вследствие рентгеновской вспышки класса M1.7 2 ноября 2021 г. максимум интенсивности потока рентгена регистрировался в 03:01 UT. Максимумы повышения амплитуды во время ВАА составили 1.69 (03:09 UT) и 2.59 дБ (03:09 UT) на радиотрассах NAA—Тикси и NAA—Якутск соответственно. На радиотрассе NWC—Якутск максимальная амплитуда во время ВАА составила 1.53 дБ (03:09 UT), понижение фазовой задержки радиосигнала во время ВФА — 90° (03:09 UT). На радиотрассе Хабаровск—Якутск максимум повышения амплитуды при ВАА — 1.18 дБ (03:04 UT), а понижение фазовой задержки радиосигнала во время ВФА — 16° (03:09 UT). На радиотрассе Хабаровск—Тикси максимум повышения амплитуды при ВАА — 2 дБ (03:04 UT), а понижение фазовой задержки радиосигнала при ВФА — 21° (03:09 UT).

Сведения о солнечных рентгеновских вспышках класса C2.9 и выше с 26 октября по 2 ноября 2021 г. и ВАА радиосигналов передатчиков РСДН-20 (11.904 кГц), NWC (19.8 кГц) и NAA (24 кГц), зарегистрированных на ст. «Якутск» и «Тикси», представлены в табл. 1. Список солнечных вспышек класса C2.9 и выше с 26 октября по 2 ноября 2021 г. и ВФА радиосигналов передатчиков РСДН-20 (11.904 кГц) и NWC (19.8 кГц), зарегистрированные на ст. «Якутск» и «Тикси», представлены в табл. 2. Зарегистрированные значения ВФА приведены к единице протяженности радиотрасс (градус/Мм).

Следует отметить, что 26 октября с 20:47 UT передатчики РСДН-20 были отключены до 08:03 UT 29 октября 2021 г., 1 ноября передатчик NWC был выключен с 00:00 до 06:40 UT.

Представим максимальное изменение амплитуды во время ВАА как функцию максимального потока рентгеновского излучения  $P$  в диапазоне 1–8 Å и усредненного вдоль всей радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца  $X$ . Значения зенитного угла вдоль трасс распространения по координатам с разрешением 200 км рассчитаны по алгоритму [http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html]. На радиотрассе Новосибирск—Якутск

Таблица 1

Солнечные рентгеновские вспышки с 26 октября по 2 ноября 2021 г.  
и внезапные амплитудные аномалии радиосигналов передатчиков РСДН-20 (11.904 кГц), NWC и NAA

Дата	Время максимального потока рентгеновского излучения	Класс	Хабаровск РСДН-20, дБ		Новосибирск РСДН-20, дБ		Краснодар РСДН-20, дБ		NWC, дБ	NAA, дБ	
			Якутск	Тикси	Якутск	Тикси	Якутск	Тикси	Якутск	Якутск	Тикси
26.10.21	1:04	C9.3	1.04	–	0.9	–	ночь	ночь	3.42	3.17	–
26.10.21	1:50	C3.5	0.45	–	1.5	–	ночь	ночь	0.82	–	–
26.10.21	2:47	M1.3	0.57	–	3.96	–	1.47	–	1.98	2.64	–
26.10.21	6:04	C7.8	0.57	–	1.06	–	1.71	–	1.26	1.31	–
27.10.21	6:08	C8.5	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	1.47	1.1	–
28.10.21	7:40	M1.4	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	2.32	1.28	ночь
29.10.21	2:42	M1.5	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	2.9	2.07	1.24
29.10.21	5:58	C4.8	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	–	1.66	1.16
29.10.21	6:07	C5.9	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	1.12	–	1.69
30.10.21	3:15	C3.9	0.59	–	–	–	–	–	–	–	–
31.10.21	7:06	C2.9	–	–	0.48	–	–	–	–	–	–
01.11.21	1:45	M1.5	1.71	1.01	1.8	–	ночь	ночь	выкл.	3.61	1.78
02.11.21	3:01	M1.7	1.18	2	2.78	–	–	–	1.53	2.59	1.69

Таблица 2

Солнечные рентгеновские вспышки с 26 октября по 2 ноября 2021 г.  
и внезапные фазовые аномалии радиосигналов передатчиков РСДН-20 (11.904 кГц) и NWC

Дата	Время максимального потока рентгеновского излучения	Класс вспышки	Хабаровск РСДН-20, градус/Мм		Новосибирск РСДН-20, градус/Мм		Краснодар РСДН-20, градус/Мм		NWC, градус/Мм
			Якутск	Тикси	Якутск	Тикси	Якутск	Тикси	Якутск
26.10.21	1:04	C9.3	5.5	–	–	–	ночь	ночь	–
26.10.21	1:50	C3.5	–	–	–	–	ночь	ночь	–
26.10.21	2:47	M1.3	7.5	–	3.03	–	–	–	–
26.10.21	6:04	C7.8	1.43	–	1.33	–	1.65	–	–
26.10.21	9:52	C5.0	ночь	ночь	ночь	ночь	1.15	–	ночь
27.10.21	6:08	C8.5	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	5.85
28.10.21	7:40	M1.4	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	8.62
29.10.21	2:42	M1.5	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	11.7
29.10.21	5:58	C4.8	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	–
29.10.21	6:07	C5.9	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	5.96
30.10.21	3:15	C3.9	3.14	–	–	–	–	–	2.34
31.10.21	7:06	C2.9	–	–	1.89	–	–	–	–
01.11.21	1:45	M1.5	8.29	5.76	4.17	–	ночь	ночь	выкл.
02.11.21	3:01	M1.7	11.43	8.64	–	–	–	–	9.57

с ростом потока рентгеновского излучения солнечных вспышек регистрируется повышение амплитуды относительно фоновых (невозмущенных) значений. На радиотрассах Хабаровск—Якутск и NWC—Якутск регистрируется насыщение при достижении потока  $6 \cdot 10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>. При дальнейшем увеличении потока рентгеновского ионизирующего излучения рост амплитуды сигнала замедляется. Схожие изменения ВАА представлены в других работах (например, [Todoroki et al., 2007]). Для описания зависимости ВФА от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца воспользуемся эмпирическим выражением [Орлов, 1998]

$$\Phi = A + B \lg(P \cos(X)), \quad (1)$$

где  $\Phi$  — изменение фазы сигнала относительно невозмущенного значения, приведенное к единице протяженности радиотрассы;  $P$  — максимальная во время вспышки интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 Å, а  $\cos X$  — усредненный вдоль всей радиотрассы косинус зенитного угла Солнца.

По данным о ВФА (см. табл. 2) на основе алгоритма [http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html] на каждой из радиотрасс с разрешением 200 км по географическим координатам был определен зенитный угол Солнца  $X$ . Условия распространения радиосигнала нами принимались за ночные, когда  $\cos X < 0$ . В табл. 3 для радиотрасс Хабаровск—Якутск, Новосибирск—Якутск и NWC—Якутск приведены пара-

Таблица 3

Параметры зависимости ВФА от логарифма произведения потока рентгеновского излучения [1–8 Å] на косинус зенитного угла Солнца, усредненного вдоль трассы распространения

Радиотрасса, протяженность	Объем выборки	Коэффициент A	Коэффициент B	Коэффициент детерминации R <sup>2</sup>	СКО остаточных невязок, градус/Мм
Хабаровск—Якутск, 1.40 Мм	6	74.56±12.3	12.36±2.22	0.89	1.37
Новосибирск—Якутск, 2.64 Мм	4	9.68±14.66	1.22±2.51	0.1	1.46
NWC—Якутск, 9.40 Мм	6	67.64±15.99	11.51±3.05	0.78	1.73

метры модели (1), оцененные методом наименьших квадратов.

Малые значения коэффициентов модели (1) с большими флуктуациями, а также малый коэффициент детерминации получены в условиях регистрации ВФА на трассе Новосибирск (РСДН-20) — Якутск вследствие малого объема выборки, при этом вспышки 26 октября (см. табл. 2) класса M1.3 и C7.8 имели повышенный фон рентгеновского излучения, что понижало чувствительность ВФА. Данные ВФА, зарегистрированные на радиотрассах Хабаровск (РСДН-20) — Якутск и NWC—Якутск с 26 октября по 2 ноября 2021 г., хорошо описываются линейной зависимостью от логарифма произведения потока рентгеновского излучения 1–8 Å на усредненный вдоль трассы распространения косинус зенитного угла. Оценки модели (1) не противоречат полученным нами ранее для большего объема выборки [Стародубцев и др., 2019].

Для определения изменения эффективной высоты Δh волновода Земля—ионосфера по регистрируемой фазовой задержке ОНЧ-радиосигнала при ВФА в условиях одномодового распространения воспользуемся выражением [Митра, 1977]

$$\Delta\varphi = \frac{360d}{\lambda} \left( \frac{1}{2R} + \frac{\lambda^2}{16h_n^3} \right) \Delta h, \quad (2)$$

где Δφ — изменение фазы ОНЧ-радиосигнала при ВФА (градусы); R — радиус Земли (км); λ — длина волны (км); d — протяженность радиотрассы (км); h<sub>n</sub> — средняя высота ионосферы (70–74 км).

В наших расчетах было принято h<sub>n</sub>=72 км. Радиус Земли определили на каждой радиотрассе путем усреднения значений, найденных по широтам, соответствующим участкам трассы с разрешением 200 км, используя модель референц-эллипсоида WGS 84 [https://planetcalc.ru/7721/?thanks=1]. Изменения эффективной высоты волновода Земля—ионосфера, оцененные по изменениям фазы радиосигналов передатчиков РСДН-20 (11.904 кГц) и NWC (19.8 кГц), зарегистрированные в «Якутске» и «Тикси» во время ВФА с 26 октября по 2 ноября 2021 г. даны в табл. 4.

На рис. 16 показаны изменения эффективной высоты волновода Земля—ионосфера на радиотрассах NWC—Якутск и Хабаровск—Якутск в зависимости от Pcos(X).

Большее изменение высоты волновода (≈1 км) наблюдается на среднеширотной радиотрассе Хабаровск—Якутск относительно трассы NWC—Якутск, половина которой расположена в низких широтах

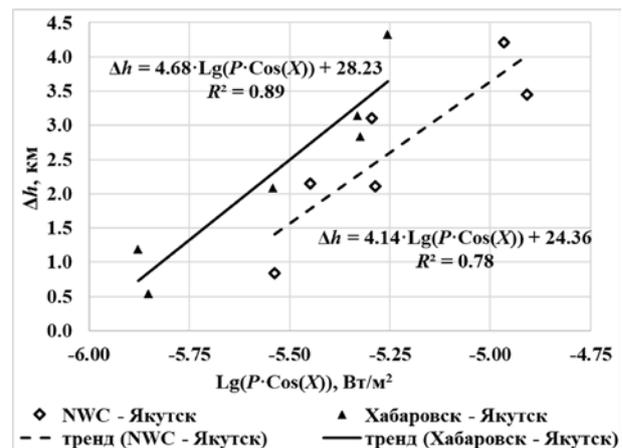


Рис. 16. Изменения эффективной высоты волновода Земля—ионосфера на радиотрассах NWC—Якутск и Хабаровск—Якутск в зависимости от потока рентгеновского излучения Солнца

и пересекает геомагнитный экватор. Это изменение может быть связано с проявлением экваториальной аномалии ионосферы.

На основе анализа амплитудно-фазовых вариаций, зарегистрированных во время внезапных ионосферных возмущений 26 октября – 2 ноября, показано, что распространение ОНЧ-радиосигнала на 11.904 кГц вдоль меридиана в дневных условиях на трассе протяженностью 1400 км можно считать одномодовым. В сети протяженных радиотрасс, оказавшихся в ночных условиях, данный факт может оказаться полезным для повышения объема выборки регистрируемых ВАА и ВФА. Проведена адаптация параметров модели ВФА, удовлетворительно описываемой линейной функцией lg(PcosX). Это может быть использовано для оценки наземным методом потока рентгеновского излучения при солнечных вспышках. По регистрируемым ВФА проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Земля—ионосфера.

### СОСТОЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ В ПЕРИОД ФОРБУШ-ЭФФЕКТА ПО ДАННЫМ СТ. «ЖИГАНСК»

На рис. 17 показаны вариации трехчасового планетарного индекса геомагнитной активности K<sub>p</sub> 26 октября – 13 ноября 2021 г. до и после форбуш-эффекта. Рассматриваемый период в основном был спокойным и средневозмущенным, кроме 3–4 ноября, когда отмечалось K<sub>p</sub>>6 с максимумом 8– (отмечено красным цветом).

Таблица 4

Изменения эффективной высоты волновода Земля—ионосфера, оцененные по изменениям фазы радиосигналов РСДН-20 (11.904 кГц) и NWC (19.8 кГц), зарегистрированные на ст. «Якутск» и «Тикси» за период ВФА с 26 октября по 2 ноября 2021 г.

Дата	Время максимального потока рентгена	Класс вспышки	Хабаровск РСДН-20, км		Новосибирск РСДН-20, км	Краснодар РСДН-20, км	NWC, км
			Якутск	Тикси	Якутск	Якутск	Якутск
26.10.21	1:04	C9.3	2.08	–	–	ночь	–
26.10.21	2:47	M1.3	2.84	–	1.15	–	–
26.10.21	6:04	C7.8	0.54	–	0.5	0.62	–
26.10.21	9:52	C5.0	ночь	ночь	ночь	0.43	ночь
27.10.21	6:08	C8.5	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	2.11
28.10.21	7:40	M1.4	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	3.1
29.10.21	2:42	M1.5	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	4.21
29.10.21	6:07	C5.9	выкл.	выкл.	выкл.	выкл.	2.15
30.10.21	3:15	C3.9	1.19	–	–	–	0.84
31.10.21	7:06	C2.9	–	–	0.72	–	–
01.11.21	1:45	M1.5	3.14	2.18	1.58	ночь	выкл.
02.11.21	3:01	M1.7	4.33	3.27	–	–	3.45

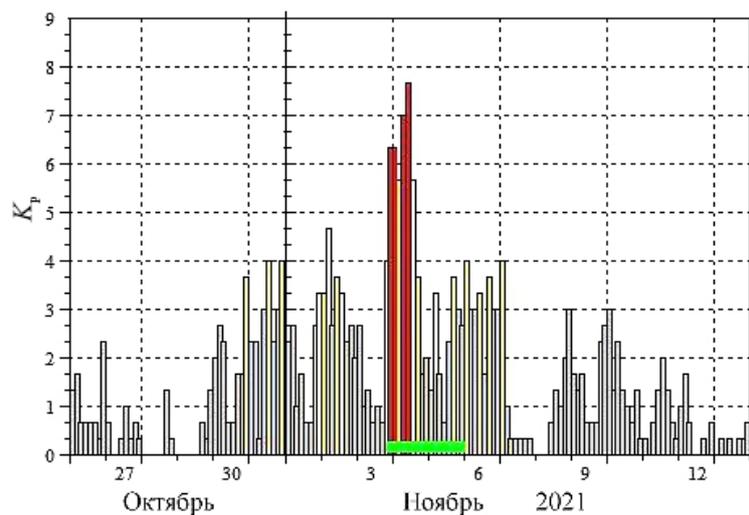


Рис. 17. Геомагнитная обстановка по  $K_p$  26 октября – 13 ноября 2021 г. Зеленый прямоугольник — форбуш-эффект

Дигизонд или цифровая ионосферная станция DPS-4 на ст. «Жиганск» ( $\Phi \approx 61^\circ \text{ N}$ ,  $\Lambda \approx 194^\circ \text{ E}$ ) зондирует ионосферу на частотах 1–12 МГц в патрульном режиме через каждые 15 мин. На рис. 18 показаны часовые значения критических частот  $f_oF2$  ионосферного слоя F2 1–9 ноября 2021 г. Форбуш-эффект, или понижение интенсивности галактических космических лучей, регистрировался 3–5 ноября 2021 г. (зеленый прямоугольник, см. также рис. 2).

Видно, что после начала форбуш-эффекта, а именно, на фазе его восстановления, в ионосфере наблюдалось полное поглощение и экранирование радиоволн КВ-диапазона (условия В и А отмечены серым прямоугольником) в течение ~12 ч. Напомним, что при условии В на измерение влияет или делает его невозможным полное поглощение радиоволн, а при условии А — наличие нижележащего слоя (экранирование) [Руководство URSI..., 1977]. Отметим также, что во время фазы восстановления форбуш-

эффекта вышеупомянутые ионосферные условия не наблюдались.

Рисунок 19 аналогичен рис. 18, но вариации  $f_oF2$  (светлые кружочки) показаны за четыре дня за каждый сеанс зондирования. Видно, что падение  $f_oF2$  с 8 до 4 МГц началось примерно в 07:00 UT 4 ноября (16:00 LT) и наблюдалось ~30 мин. Это однозначно говорит о смещении границы замкнутых силовых линий в сторону экватора или развитии магнитосферно-ионосферной возмущенности. Событие произошло перед началом периода поглощения и экранирования F2-слоя, который длился ~14 ч. Таким образом, запаздывание ионосферных возмущений на широте ст. «Жиганск» (условий В, А) от начала форбуш-эффекта составило ~7 ч.

На рис. 20 показаны вариации риометрического поглощения 3–5 ноября 2021 г. на ст. «Маймага». Зеленый отрезок — форбуш-эффект, синий — ионосферные возмущения или условия В, А над ст. «Жи-

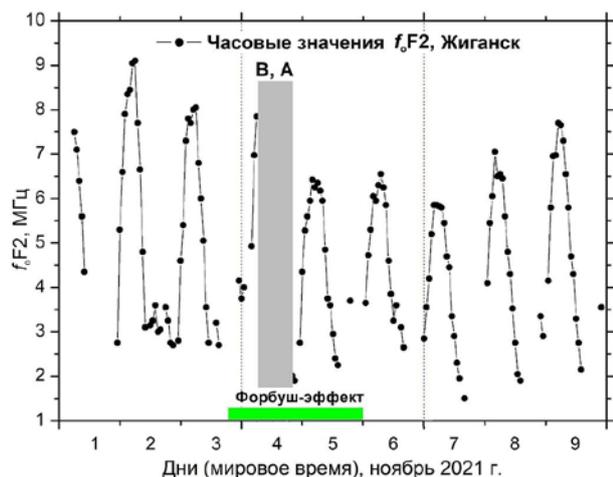


Рис. 18. Часовые вариации  $f_oF2$  по ионосферной станции «Жиганск» 1–9 ноября 2021 г. Полное поглощение и экранирование радиоволн КВ-диапазона, серый прямоугольник — условия В, А

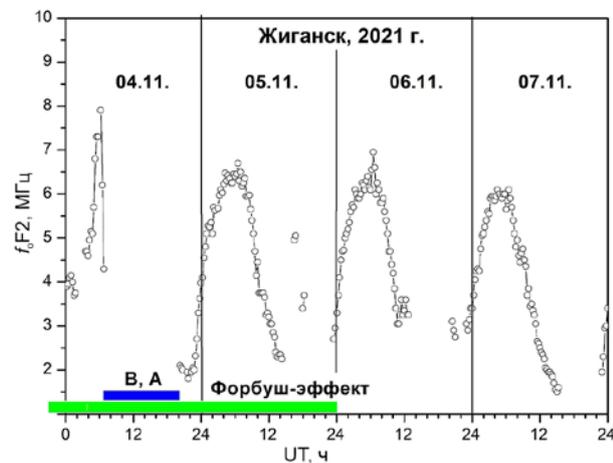


Рис. 19. Пятнадцатиминутные вариации  $f_oF2$  по ионосферной станции «Жиганск» 4–7 ноября 2021 г. Полное поглощение и экранирование радиоволн КВ-диапазона, синий прямоугольник — условия В, А

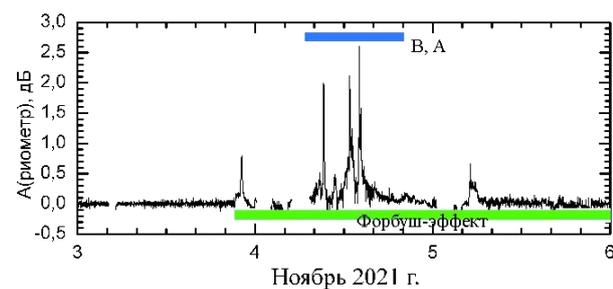


Рис. 20. Вариации риометрического поглощения 3–5 ноября 2021 г. Полное поглощение и экранирование радиоволн КВ-диапазона, синий прямоугольник — условия В, А, зеленый — время форбуш-эффекта

ганск». Видно, что начало форбуш-эффекта в вариациях риометрического поглощения в конце 3 ноября отмечалось кратковременным ростом интенсивности до 0.75 дБ, что предопределяет приход на магнитополосу Земли ударной волны от вспышки на Солнце. Затем до ~08:00 UTC 4 ноября в вариациях риометрического поглощения имеются пропуски данных. Максимумы поглощения до 2.5 дБ наблюдаются во время ионосферного возмущения.

По данным ионосферной станции «Жиганск» обнаружено, что во время первой половины форбуш-эффекта наблюдалось ионосферное возмущение, которое проявилось в полном поглощении и экранировании радиоволн КВ-диапазона.

После активной фазы форбуш-эффекта на ионосферной станции «Жиганск» наблюдались  $f_oF2$ , пониженные на 1.5–2.0 МГц вследствие магнитосферно-ионосферной бури, сопровождающей форбуш-эффект.

Риометрическое поглощение показывает, что максимумы поглощения наблюдаются на фазе понижения форбуш-эффекта.

### ОПТИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Меридиональная сеть оптических станций ИКФИА СО РАН состоит из трех наблюдательных пунктов. Три идентичных спектрографа установлены на разнесенных по широте оптических станциях «Тикси», «Маймага» (63° N, 129.5° E, около Якутска) и «Нерюнгри» (56,7° N, 124,7° E).

Постоянная регистрация полос гидроксила OH(3, 1) с 2014 г. проводится на оптическом полигоне «Маймага», который расположен в 120 км к северу от Якутска. Инфракрасный спектрограф регистрирует полосы гидроксила OH(3, 1) в далекой инфракрасной области (~1.5 мкм). Он состоит из монохроматора Shamrock, оснащенного высокочувствительным инфракрасным фотодиодным детектором фирмы ANDOR. Рабочий диапазон длин волн составляет 1490–1544 нм, охлаждение — -60 °С, угол зрения ~3°, разрешение спектрографа при ширине входной щели 0.2 мм равно 0.8 нм. Спектры молекулы гидроксила OH(3, 1), излучающиеся на высоте ~87 км, регистрируются в автоматическом режиме при угле погружения Солнца больше 9° каждую минуту и передаются ежесуточно на сервер Института.

В сентябре 2015 г. аналогичный инфракрасный спектрограф был установлен в ПГО «Тикси», а в октябре 2017 г. — на наблюдательном пункте в Нерюнгри. Таким образом, на всех трех станциях имеются идентичные светочувствительные инфракрасные спектрографы, регистрирующие полосу гидроксила в далекой инфракрасной области. Согласно многим последним работам, полоса OH(3, 1) достаточно хорошо термализуется [Шефов и др., 2006] и соответствует температуре окружающей нейтральной атмосферы на высоте ее излучения. Выбор полосы излучения гидроксила в инфракрасной области обусловлен тремя обстоятельствами: во-первых, наибольшей интенсивностью эмиссий гидроксила в этой области спектра, во-вторых, меньшим вкладом паразитного света от звезд и Луны, в-третьих, отсутствием эмиссий полярных сияний.

Измерения инфракрасного спектрографа проводились в ночное время суток в безоблачную и малооблачную погоду. Регистрировались эмиссии гидроксила OH(3, 1) с экспозицией 60 с. Метод оценки вращательной температуры молекулярных эмиссий основан на подгонке методом наименьших квадратов модельных спектров, построенных с учетом аппаратной функции прибора для различных, заранее заданных температур, к реально измеренному спектру.

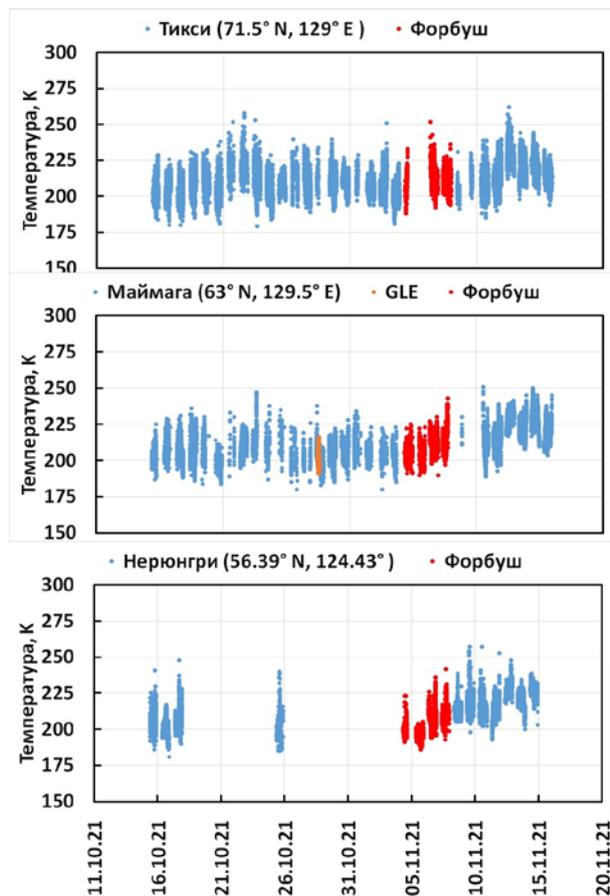


Рис. 21. Вращательные температуры эмиссии гидроксила OH (3, 1) на трех разных станциях

Во время GLE и форбуш-понижений космических лучей не обнаружено значимых вариаций температуры нейтральной атмосферы, выходящих за уровень шумов. Данные наблюдений значений температуры нейтральной атмосферы на высоте  $\sim 87$  км 11–20 ноября 2021 г. для ст. «Нерюнгри», «Маймага» и «Тикси» показаны на рис. 21.

### НАБЛЮДЕНИЯ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ И СУБАВРОРАЛЬНОГО СВЕЧЕНИЯ НА МЕРИДИАНЕ ЯКУТСКА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 4 НОЯБРЯ 2021 Г.

Главная фаза магнитной бури началась в  $\sim 21:35$  UT 3 ноября 2021 г. вследствие прихода потока плазмы от солнечной вспышки. Оптические наблюдения на ст. «Маймага» и «Тикси» проводились по астрономической программе до 21:20 UT 3 ноября и были автоматически продолжены 4 ноября с 08:50 и 09:15 UT соответственно. Начало наблюдений на ст. «Маймага» характеризовалось переменной облачностью, и только с  $\sim 09:15$  до  $\sim 11:00$  UT прозрачность атмосферы стала удовлетворительной для регистрации сияний и субаврорального свечения по всему небу. На ст. «Тикси» по атмосферным условиям регистрация динамики сияний была возможна до  $\sim 11:00$  UT.

Наблюдения сияний на ст. «Тикси» проводились камерой всего неба Keo Horizon в видимой области спектра. На ст. «Маймага» субавроральное свечение и сияния регистрировались камерой всего неба Keo Sentry в отдельных эмиссиях [Иевенко, Парников, 2022]. На рис. 22 показаны данные камер всего неба на двух станциях в виде кеограмм в 09:00–11:30 UT 4 ноября 2021 г. Кеограмма ст. «Тикси» (а) показывает динамику дискретных сияний вдоль меридиана в интервале геомагнитных широт  $63^\circ$ – $71^\circ$ . Кеограммы ст. «Маймага» (б, в) отображают динамику сияний и субаврорального свечения в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм [OI] на широтах  $52^\circ$ – $62^\circ$ .

В  $\sim 09:12$  UT началась фаза развития суббури по среднеширотным магнитограммам (см. рис. 5) при  $SUM-H \sim 100$  нТл. В это время в условиях переменной облачности наблюдалось уярчение широкой лучистой полосы сияния в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм в окрестности зенита ст. «Маймага» и быстрое расширение области интенсивных сияний к полюсу. На кеограммах видно кратковременное увеличение интенсивности этих эмиссий с максимумом на широтах  $57^\circ$ – $62^\circ$ . Экваториальное дискретных сияний было зарегистрировано усиление диффузного сияния (ДС) (панели б, в). Кеограмма ст. «Тикси» (а) отображает смещение дискретных сияний к полюсу от южного горизонта до геомагнитной широты  $\sim 68.5^\circ$  (образование авроральной выпуклости).

С  $\sim 09:30$  UT наблюдалось движение дискретных сияний к экватору на ст. «Тикси» во время фазы восстановления суббури. На ст. «Маймага» после быстрого затухания авроральной активности регистрировалась экваториальная граница ДС в окрестности зенита и стабильная авроральная красная дуга (SAR-дуга) в эмиссии 630.0 нм интенсивностью 600–900 Рл на южном горизонте до  $\sim 11:00$  UT.

На рис. 23 показаны обработанные изображения с регистрацией сияний и субаврорального свечения по всему небу в геомагнитных координатах. Регистрация выполнена при хорошей прозрачности атмосферы в 10:04 UT во время фазы восстановления суббури. В это время на ст. «Тикси» (см. рис. 23, а) интенсивные дискретные сияния наблюдались на геомагнитной широте  $\sim 66^\circ$  и двигались к экватору согласно кеограмме (см. рис. 22, а, 10:04 UT). На ст. «Маймага» регистрировались экваториальная граница ДС в окрестности зенита на широте  $\sim 58^\circ$  и дискретные сияния на северном горизонте в двух эмиссиях. На 630.0 нм наблюдалась SAR-дуга интенсивностью  $\sim 800$  Рл значительно южнее станции с уменьшением геомагнитной широты к востоку (см. рис. 22, в).

На рис. 23, в изображение построено в проекции на поверхность Земли для высоты ДС 250 км в эмиссии 630.0 нм. Для принятой высоты красной дуги 350–400 км ее проекция в 10:04 UT была на широтах  $\sim 50^\circ$ – $53^\circ$  на меридиане станции наблюдений.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе проведенного комплексного анализа можно сделать следующие выводы.

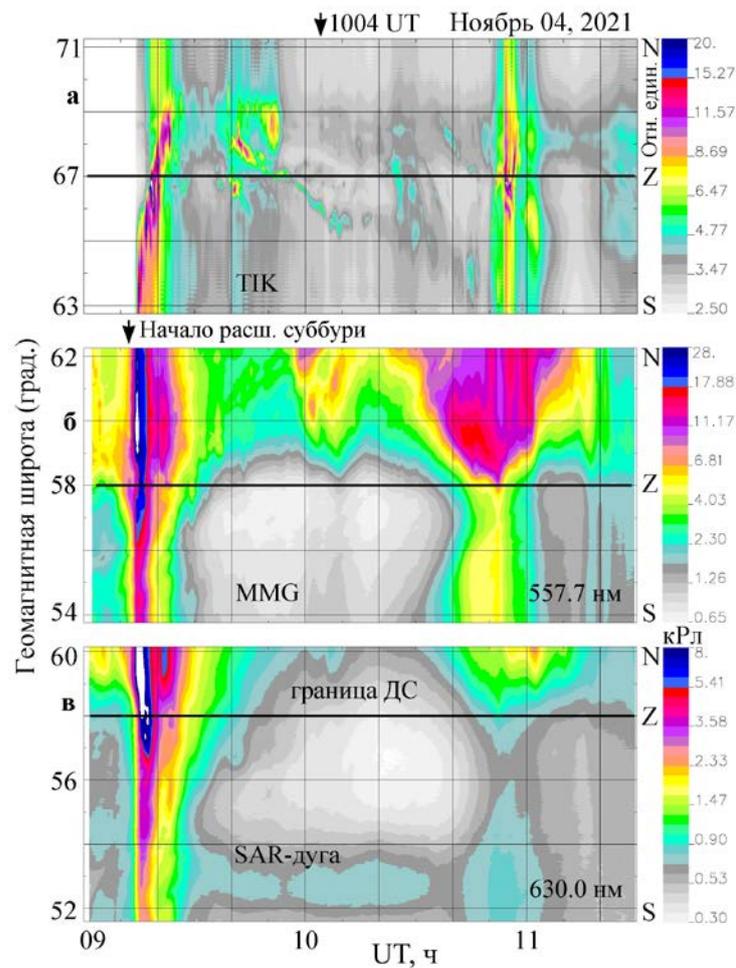


Рис. 22. Динамика сияний и субаврорального свечения на меридиане Якутска во время магнитной бури 3–4 ноября 2021 г.: *a* — кеограмма ст. «Тикси» в проекции на поверхность Земли для высоты сияний в видимой области спектра 110 км; *б, в* — кеограммы в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм [OI] ст. «Маймага» для высоты свечения 110 и 250 км соответственно; Z — зенит станции наблюдений. Цветные шкалы интенсивности эмиссий показаны в относительных единицах для ст. «Тикси» и в килореляях для ст. «Маймага»

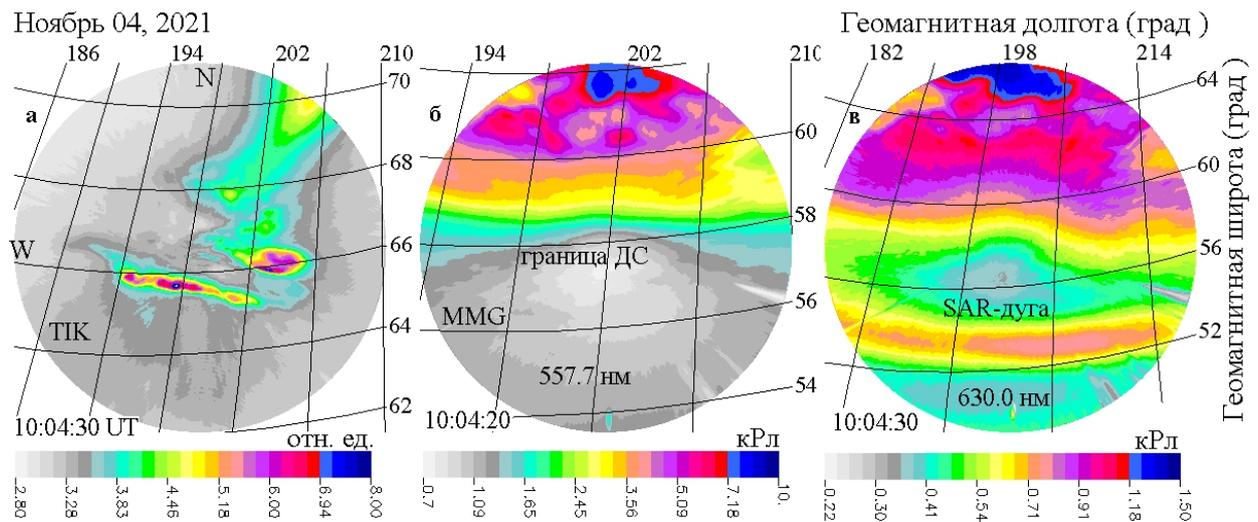


Рис. 23. Пример регистрации сияний и субаврорального свечения по всему небу на двух станциях в событии 4 ноября 2021 г. Показаны обработанные изображения в проекции на поверхность Земли для высоты дискретных сияний 110 км на ст. «Тикси» (*a*), для высоты субаврорального свечения 110 и 250 км в эмиссиях 557.7 и 630 нм соответственно на ст. «Маймага» (*б, в*). Шкалы интенсивности эмиссий приведены в килореляях (*б, в*), для ст. «Тикси» (*a*) — в относительных единицах

1. Нейтронными мониторами ИКФИА СО РАН, установленными на ст. «Якутск» и ПГО «Тикси», зарегистрировано первое наземное возрастание потока СКЛ в новом 25-м цикле солнечной активности. Это событие стало 73-м со времени регистрации первой вспышки СКЛ 28 февраля 1942 г. и сейчас известно как GLE73 с небольшой амплитудой даже на полярных станциях КЛ до 6 %.

2. Произошедшая 2 ноября 2021 г. солнечная вспышка класса M1.7 вызвала первый в 25-м солнечном цикле мощный форбуш-эффект, который начался в конце 3 ноября. Его амплитуда по одноминутным исправленным на давление данным НМ на ст. «Тикси» достигла 18.9 % и ст. «Якутск» — 16.1 %.

3. По данным наблюдений Якутской меридиональной цепочки магнитных станций показано, что 3 ноября 2021 г. в утреннем секторе севернее ст. «Жиганск», но южнее о-ва Котельный на широте  $61^\circ < \Phi' < 70^\circ$  в ионосфере развилась электроструя западного направления, отклоненная на  $\sim 30^\circ\text{--}35^\circ$  к северу. Картина изменений  $H$ -составляющих магнитного поля на ст. «Жиганск» и «Якутск», располагавшихся в утреннем секторе, вполне укладывается в распределение магнитных векторов мировой сети SuperMAG как часть полярной токовой системы DP11 и дополняет картину реальных магнитных векторов. Данные проекта AMPERE о распределениях магнитных вариаций на ионосферных высотах и продольных токов в утреннем секторе позволяют уточнить расположение авроральной западной электроструи на  $\Phi' \sim 67^\circ \text{N}$ .

4. По измерениям Якутской меридиональной цепочки магнитных станций в период сильной геомагнитной бури установлено, что 4 ноября 2021 г. в послеполуночном и вечернем секторах на широте  $56^\circ < \Phi' < 61^\circ$  имела место восточная электроструя, в поздние вечерние и ночные часы ст. «Жиганск» и «Якутск» находились под сложной системой ионосферных токов. Данные проекта AMPERE о распределениях магнитных вариаций на ионосферных высотах и продольных токов в утреннем секторе позволяют уточнить расположение авроральной восточной электроструи на  $\Phi' \sim 58^\circ \text{N}$ .

5. Рассмотрены условия в межпланетной среде в период развития сильной геомагнитной бури 3–11 ноября 2021 г. По данным о вариациях параметров СВ и  $Dst$ -индекса геомагнитной активности можно предположить, что событие, происшедшее 3 ноября и определенное как изолированная интенсивная суббура, вероятно, является элементом начальной фазы описанной бури.

6. При полном промерзании грунта наблюдается более крутая зависимость разности потенциалов от величины магнитного поля, чем при максимальном протаивании верхней части грунта. Коэффициент наклона в восемь раз больше. Коэффициенты зависимости, наблюдаемой в начале ноября 2021 г., по времени ближе к зимним значениям. Изменение этих коэффициентов связано с изменением проводимости грунта.

7. Во время событий в начале ноября 2021 г. наблюдались непрерывные и квазипериодические широкополосные шипения, связанные с изменением направления  $B_z$ -компоненты ММП: изменение нижней и верхней частот и интенсивности ОНЧ-излучения в диапазонах 1.0–13.5 кГц в 21:00–23:00 UT 3 ноября, 0.7–4.5 кГц в 01:00–03:00 UT 4 ноября, 3.0–5.2 кГц в 12:00–13:00 UT 4 ноября, 2.2–5.0 кГц в 10:10–11:40 UT 4 ноября. Наблюдались также QR-шипения в 02:15–02:50 UT 4 ноября с возрастанием частот в диапазоне 1.6–4.3 кГц с периодами 80–100 с.

8. На основе анализа амплитудно-фазовых вариаций, зарегистрированных во время внезапных ионосферных возмущений в период 26 октября – 2 ноября показано, что распространение ОНЧ-радиосигнала на частоте 11.904 кГц вдоль меридиана в дневных условиях на трассе 1400 км можно считать одномодовым.

9. Проведена адаптация параметров модели ВФА, удовлетворительно описываемой линейной функцией логарифма произведения потока рентгеновского излучения и усредненного вдоль радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца. По регистрируемым ВФА проведена оценка изменения эффективной высоты волновода Земля—ионосфера.

10. По данным ионосферной станции «Жиганск» выявлено, что во время форбуш-эффекта наблюдалось ионосферное возмущение, которое проявилось в полном поглощении и экранировании радиоволн КВ-диапазона. После активной фазы форбуш-эффекта на ионосферной станции «Жиганск» наблюдались пониженные на 1.5–2.0 МГц критические частоты F2-слоя вследствие магнитосферно-ионосферной бури, вызванной форбуш-эффектом. Риометрическое поглощение показывает, что максимумы поглощения наблюдаются во время отрицательной фазы форбуш-эффекта.

11. Во время GLE и форбуш-понижения КЛ не обнаружено значимых вариаций температуры нейтральной атмосферы, выходящих за уровень шумов.

12. В начальной фазе развития суббури наблюдалось уярчение широкой лучистой полосы сияния в эмиссиях 557.7 и 630.0 нм в окрестности зенита ст. «Маймага» и быстрое расширение области интенсивных сияний к полюсу с максимумом на широтах  $57^\circ\text{--}62^\circ$  в вечернем секторе MLT. Экваториальнее дискретных сияний было зарегистрировано усиление ДС. На ст. «Тикси» наблюдалось смещение дискретных сияний к полюсу от южного горизонта до геомагнитной широты  $\sim 68.5^\circ$  (образование авроральной выпуклости). Во время фазы восстановления суббури наблюдалось движение дискретных сияний к экватору. На ст. «Маймага» после быстрого затухания авроральной активности регистрировалась экваториальная граница ДС в окрестности зенита на широте  $\sim 58^\circ$  и стабильная авроральная красная дуга (SAR-дуга) в эмиссии 630.0 нм интенсивностью 600–900 Рл на геомагнитных широтах  $\sim 50^\circ\text{--}53^\circ$  до  $\sim 11:00 \text{ UT}$ .

Авторы благодарны за возможность использования данных о геомагнитных индексах Мировому

центру данных в Киото, Япония, о межпланетных данных — Центру космических полетов им. Годдарда НАСА (NASA's Goddard Space Flight Center), о геомагнитных данных мировой сети — проекту SuperMAG, о магнитных векторах и продольных токах — команде AMPERE и Центру научных данных AMPERE — за предоставление данных, полученных из группировки Iridium Communications, благодаря поддержке Национального научного фонда (AMPERE Team, AMPERE Science Data Center).

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ на выполнение Государственного задания ИКФИА СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Баишев Д.Г., Самсонов С.Н., Моисеев А.В. и др. Мониторинг и исследование эффектов космической погоды с помощью меридиональной цепочки инструментов в Якутии: краткий обзор. *Солнечно-земная физика*. 2017. Т. 3, № 2. С. 27–35. DOI: [10.12737/22607](https://doi.org/10.12737/22607) // Baishev D.G., Samsonov S.N., Moiseev A.V., et al. Monitoring and investigating space weather effects with meridional chain of instruments in Yakutia: a brief overview. *Solar-Terrestrial Physics*. 2017. Vol. 3, iss. 2. P. 25–33. DOI: [10.12737/stp-3220175](https://doi.org/10.12737/stp-3220175).

Иевенко И.Б., Парников С.Г. Связь динамики SAR-дуги с суббуревой инжекцией по наблюдениям полярных сияний. Магнитосферные явления в окрестности плазмопаузы. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2022. Т. 61, № 2. С. 171–188. DOI: [10.31857/S0016794022020092](https://doi.org/10.31857/S0016794022020092).

Козлов В.И., Баишев Д.Г., Павлов Е.А. Вариации естественных электрических потенциалов в криолитозоне, Якутск. *Физика Земли*. 2022. Т. 2, № 3. С. 153–160.

Крымский Г.Ф. Диффузионный механизм суточной вариации космических лучей. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1964. Т. 4. С. 977–986.

Куражковская Н.А., Зотов О.Д., Клайн Б.И. Связь развития геомагнитных бурь с параметром  $\beta$  солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 4. С. 25–34. DOI: [10.12737/szf-74202104](https://doi.org/10.12737/szf-74202104) // Kurazhkovskaya N.A., Zotov O.D., Klain B.I. Relationship between geomagnetic storm development and the solar wind parameter  $\beta$ . *Solar-Terrestrial Physics*. 2021. Vol. 7, iss. 4. P. 24–32. DOI: [10.12737/stp-74202104](https://doi.org/10.12737/stp-74202104).

Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Громова Л.И. и др. Дневные ОНЧ-излучения во время восстановительной фазы магнитной бури: событие 5 января 2015 г. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2020. Т. 60, № 3. С. 318–328. DOI: [10.31857/S0016794020030116](https://doi.org/10.31857/S0016794020030116).

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

Мурзаева Н.Н., Муллаяров В.А., Козлов В.И., Каримов Р.Р. Морфологические характеристики среднеширотного регулярного шумового фона естественного низкочастотного излучения. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2001. Т. 41, № 1. С. 76–83.

Орлов А.Б., Пронин А.Е., Уваров А.Н. Широтная зависимость эффективного коэффициента потерь электронов в дневной нижней ионосфере по данным о вариациях фазы СДВ-полей и риометрического поглощения при ВИБ. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1998. Т. 38, № 3. С. 102–110.

*Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм: пер. с англ.* / Ред. Н.В. Медникова. М.: Наука, 1977. 342 с.

Стародубцев С.А., Баишев Д.Г., Григорьев В.Г. и др. Анализ солнечных, космо- и геофизических событий в сентябре 2017 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 17–38. DOI: [10.12737/szf-51201903](https://doi.org/10.12737/szf-51201903) // Starodubtsev S.A., Baishev D.G.,

Grigoryev V.G., et al. Analyzing solar, cosmic, and geophysical events in September 2017, SHICRA SB RAS complex observations. *Solar-Terrestrial Physics*. 2019, vol. 5, iss. 1. P. 14–27. DOI: [10.12737/stp-51201903](https://doi.org/10.12737/stp-51201903).

Шефов Н.Н., Семенов А.И., Хомич В.Ю. *Излучение верхней атмосферы — индикатор ее структуры и динамики*. М.: ГЕОС, 2006. 741 с.

Яхнин А.Г. Магнитосферная суббуря: основные проявления и возможные механизмы. *Плазменная гелиогеофизика*. Т. 1 / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: Физматлит, 2008. С. 465–483.

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Krivoshepin P.A., et al. Cosmic ray anisotropy based on Yakutsk station in real time. *Adv. Space Res.* 2008. Vol. 41, iss. 6. P. 943–946. DOI: [10.1016/j.asr.2007.04.072](https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.04.072).

Howard T. Coronal Mass Ejections: An Introduction, Astrophysics and Space Science Library. Springer Science+Business Media, LLC. 2011. Vol. 376. DOI: [10.1007/978-1-4419-8789-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8789-1).

Krymsky G.F., Krivoshepin P.A., Grigoryev V.G., et al. Dynamics of the Cosmic Ray Current Behaviour During Large-Scale Solar Wind Disturbances. Proc. 28<sup>th</sup> ICRC, Tsukuba, Japan, 2003. SH 2.2. P. 3613–3616.

Kumar A., Kumar S. Solar flare effects on D-region ionosphere using VLF measurements during low- and high-solar activity phases of solar cycle 24. *Earth, Planets and Space*. 2018. Vol. 70, no. 29. P. 1–14. DOI: [10.1186/s40623-018-0794-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0794-8).

Loewe C.A., Prolss G.W. Classification and mean behavior of magnetic storms. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102, no. A7. P. 14209–14213.

Todoroki Y., Maekawa S., Yamauchi T., et al. Solar flare induced D region perturbation in the ionosphere, as revealed from a short-distance VLF propagation path. *Geophys. Res. Lett.* 2007. Vol. 34, iss. 3, L03103. P. 1–5. DOI: [10.1029/2006GL028087](https://doi.org/10.1029/2006GL028087).

Yumoto K., Tanaka Y., Oguti T., et al., and the 210° MM Magnetic Observation Group. Globally coordinated magnetic observations along 210° magnetic meridian during STEP period, 1, Preliminary results of low-latitude Pc 3's. *J. Geomag. Geoelectr.* 1992. Vol. 44. P. 261–276.

URL: <http://www.nmdb.eu> (дата обращения 22 марта 2024 г.).

URL: <http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html> (дата обращения 22 марта 2024 г.).

URL: [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list) (дата обращения 20 апреля 2023 г.).

URL: <https://www.spaceweather.com> (дата обращения 20 апреля 2023 г.).

URL: <https://solarmonitor.org> (дата обращения 20 апреля 2023 г.).

URL: <https://planetcalc.ru/7721/?thanks=1> (дата обращения 20 апреля 2023 г.).

URL: <https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/> (дата обращения 14 ноября 2023 г.).

URL: [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae\\_realtime/](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/ae_realtime/) (дата обращения 14 ноября 2023 г.).

URL: <https://supermag.jhuapl.edu/> (дата обращения 14 ноября 2023 г.).

URL: <https://ampere.jhuapl.edu/> (дата обращения 14 ноября 2023 г.).

URL: [https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst\\_provisional/index.html](https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_provisional/index.html) (дата обращения 14 ноября 2022 г.).

*Как цитировать эту статью:*

Козлов В.И., Стародубцев С.А., Григорьев В.Г., Баишев Д.Г., Макаров Г.А., Павлов Е.А., Каримов Р.Р., Корсаков А.А., Степанов А.Е., Колтовской И.И., Аммосов П.П., Гаврильева Г.А., Иевенко И.Б., Парников С.Г. Анализ гелио- и геофизических событий в октябре–ноябре 2021 г. по комплексным наблюдениям ИКФИА СО РАН. *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, № 1. С. 10–30. DOI: [10.12737/szf-111202502](https://doi.org/10.12737/szf-111202502).