

**АНАЛИЗ СОЛНЕЧНЫХ, КОСМО- И ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ
В СЕНТЯБРЕ 2017 г. ПО КОМПЛЕКСНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ИКФИА СО РАН**

**ANALYZING SOLAR, COSMIC, AND GEOPHYSICAL EVENTS
IN SEPTEMBER 2017 USING SHICRA SB RAS COMPLEX OBSERVATIONS**

С.А. Стародубцев

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

Д.Г. Баишев

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

В.Г. Григорьев

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

Р.Р. Каримов

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

В.И. Козлов

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

А.А. Корсаков

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

Г.А. Макаров

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

А.В. Моисеев

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

S.A. Starodubtsev

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

D.G. Baishev

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

V.G. Grigoryev

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

R.R. Karimov

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

V.I. Kozlov

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

A.A. Korsakov

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

G.A. Makarov

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

A.V. Moiseev

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

Аннотация. Приводятся результаты мониторинга космических лучей и геомагнитного поля вдоль 210 магнитного меридиана на территории Якутии в первой половине сентября 2017 г. Сообщается об установлении энергетического спектра наземного возрастания космических лучей 10 сентября $J=3027E^{-1.99}\exp(-E/729\text{ МэВ})$. Приводятся результаты прогноза и комплексного анализа магнитной бури 7–9 сентября 2017 г. с $Dst=-124$ нТл. Заблаговременность прогноза составила около суток. Рассмотрено ее влияние на изменения электрического потенциала и распространение сигналов радиостанций радионавигационной системы РСДН-20 в ОНЧ-диапазоне. Во время магнитной бури 8 сентября 2017 г. с 12 до 20 UT в широком диапазоне периодов наблюдались иррегулярные пульсации от P13 до P11. При этом они сопровождалась вариациями величин естественных потенциалов электротеллурического и геомагнитного полей с коэффициентом корреляции между ними $\rho(E, H)=0.5\div 0.9$. Эффекты магнитной бури проявились в виде повышения зату-

Abstract. We report the results of monitoring of cosmic rays and geomagnetic field along 210 magnetic meridians in Yakutia in the first half of September 2017. The energy spectrum of solar cosmic rays during Ground Level Enhancement in September 10, 2017 is estimated as $J=3027E^{-1.99}\exp(-E/729\text{ MeV})$. We present the results of the forecast and complex analysis of the magnetic storm on September 7–9, 2017 with $Dst=-124$ nT. The forecast lead time is about one day. We examine how the storm affected the electric potential and VLF signal propagation from RSDN-20 radio navigation stations. Irregular P13–P11 pulsations occurred during the September 8, 2017 magnetic storm from 12 to 20 UT. The pulsations were accompanied by variations in electrotelluric potentials and geomagnetic fields with the correlation coefficient between them $\rho(E, H)=0.5\div 0.9$. The effects of the magnetic storm manifested themselves as an increase in the attenuation and a decrease in the phase delay of VLF radio signals.

хания и уменьшения фазовой задержки ОНЧ-радиосигналов.

Ключевые слова: космические лучи, солнечные вспышки, потоки солнечных протонов, магнитная буря, электрические потенциалы, распространение ОНЧ-радиоволн.

Keywords: cosmic rays, solar flares, solar proton fluxes, magnetic storm, electric potentials, VLF radio wave propagation.

ОБЩАЯ ГЕЛИО-, КОСМО- И ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСТАНОВКА В СЕНТЯБРЕ 2017 г.

В настоящее время мы находимся вблизи минимума 24-го цикла солнечной активности (рис. 1). В это время трудно ожидать какой-либо сильной активности Солнца и соответствующих эффектов космической погоды. Однако после длительного периода спокойствия в первой половине сентября 2017 г. Солнце неожиданно активизировалось, что проявилось в его вспышечной и корональной активности. В это время не наблюдалось каких-либо выдающихся событий — тем не менее, сама активизация Солнца в минимуме 11-летнего цикла и ее геофизические проявления обращают на себя внимание. Поэтому представляет несомненный интерес их изучение по данным комплексных наблюдений различными приборами Института космических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН (ИКФИА СО РАН), образующими единую сеть пунктов измерений различных физических параметров.

После долгого затишья в начале сентября 2017 г. на Солнце появилось несколько крупных групп пятен (рис. 2), в которых произошел целый ряд мощных вспышек.

С 4 по 10 сентября 2017 г. на Солнце было зарегистрировано 26 вспышек класса М и 4 вспышки класса X, что является максимальным проявлением вспышечной активности с апреля 2015 по май 2018 г. В это время космическими аппаратами серии GOES в одной и той же активной области AR 12673 на Солнце был зафиксирован ряд больших вспышек балла М и X (рис. 3). Информация о них доступна на сайте [https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/2017/09/goes15/csv/g15_xrs_1m_20170901_20170930.csv]. Список наиболее мощных вспышек представлен в табл. 1. Большинство сопровождалось выбросами корональной массы [<http://www.spaceweather.com>], а в околоземном космическом пространстве были зарегистрированы возрастания потока солнечных космических лучей (СКЛ), форбуш-понижений и магнитных бурь.

На рис. 4 в шести различных энергетических каналах показана динамика интегральных потоков

Таблица 1

Наиболее мощные солнечные вспышки, зарегистрированные в сентябре 2017 г. [<http://www.solarham.net/top10.txt>; <https://www.spaceweatherlive.com>]

Класс рентгеновской вспышки	Дата	Начало, UT	Максимум, UT
M5.5	04.09.2017	20:28	20:33
X2.2	06.09.2017	08:57	09:10
X9.3	06.09.2017	11:53	12:02
M7.3	07.09.2017	10:11	10:15
X1.3	07.09.2017	14:20	14:36
M8.1	08.09.2017	07:40	07:49
X8.2	10.09.2017	15:35	16:06

протонов, зарегистрированных на космическом аппарате GOES-15 с 1 по 15 сентября 2017 г. [https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/2017/09/goes15/csv]. Видно, что возрастание потоков солнечных частиц наблюдалось в широком диапазоне энергий от 5 до более чем 100 МэВ. Особенный интерес при этом представляет событие 10 сентября, когда было зарегистрировано и наземное возрастание потока частиц — так называемое Ground Level Enhancement (GLE). Нужно отметить, что такие события являются достаточно редкими — за всю историю их регистрации с 1942 г. данное событие имеет порядковый номер всего лишь 72 (GLE72).

В этот же период времени на Земле были зарегистрированы магнитные бури. На рис. 5 представлены данные мирового центра данных по геомагнетизму в Киото. Показана динамика Dst в сентябре 2017 г. Видно, что с 7 по 15 сентября наблюдалось несколько возмущений магнитного поля Земли. В соответствии с классификацией [https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm] их можно отнести к интенсивной (конец 7 сентября) и умеренным (начало 13 и 14 сентября) геомагнитным бурям.

Эти неожиданные проявления повышенной солнечной активности вблизи ее минимума представляют значительный интерес для фундаментальных и прикладных исследований в области солнечно-земных связей.

ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

В ИКФИА СО РАН измерения интенсивности космических лучей (КЛ) проводятся в двух пунктах. Первый находится в Полярной геофизической обсерватории (ПГО) Тикси (71.60° N, 128.90° E, высота над уровнем моря 0 м), где установлен нейтронный монитор 18-NM-64, который работает в непрерывном режиме 1-минутной и 1-часовой регистрации. Второй — в г. Якутске (61.59° N, 129.41° E, высота над уровнем моря 95 м). Здесь расположен спектрограф КЛ им. А.И. Кузьмина. В его состав входит целый комплекс детекторов: 1) нейтронный монитор 24-NM-64; 2) четыре однотипных мюонных телескопа МТ на газоразрядных счетчиках СГМ-14, которые регистрируют частицы, приходящие из пяти различных направлений, и установлены на уровне земли (0-м водного эквивалента, м в.э., и в расщелках специально вырытой шахты на уровнях 7, 20 и 40 м в.э.; 3) четыре новых однотипных сцинтилляционных мюонных телескопа SMT на счетчиках СЦ-301, способных регистрировать частицы, приходящие из 13 различных направлений, и установленных на тех же четырех уровнях. Регистрация мюонов телескопами МТ на газоразряд-

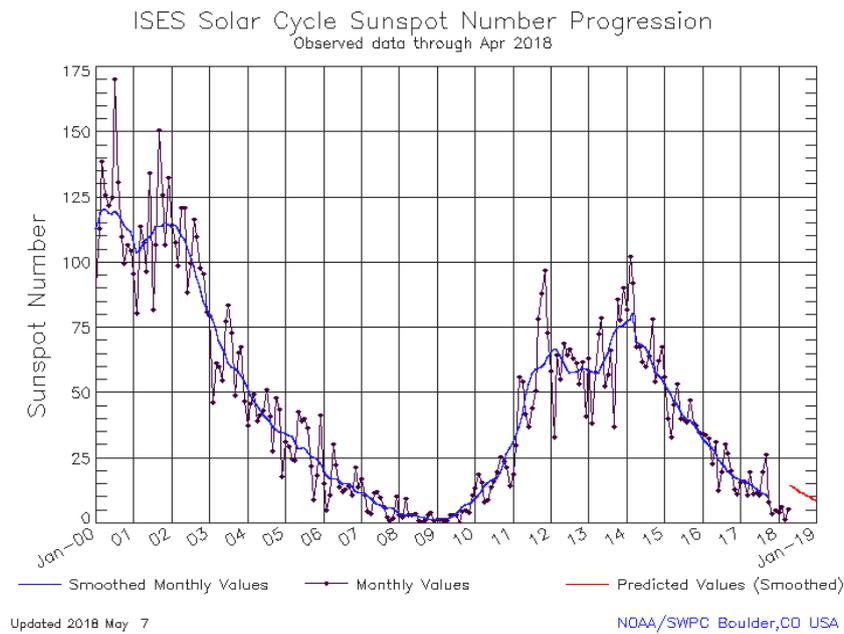


Рис. 1. Число солнечных пятен в зависимости от времени [<http://www.solarham.net>]

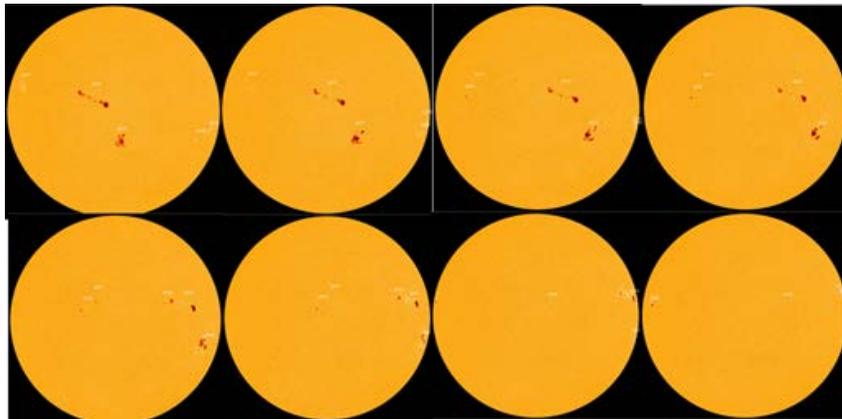


Рис. 2. Движение групп пятен по диску Солнца 4–11 сентября 2017 г. по данным SDO/HML [<http://www.space-weather.com>]

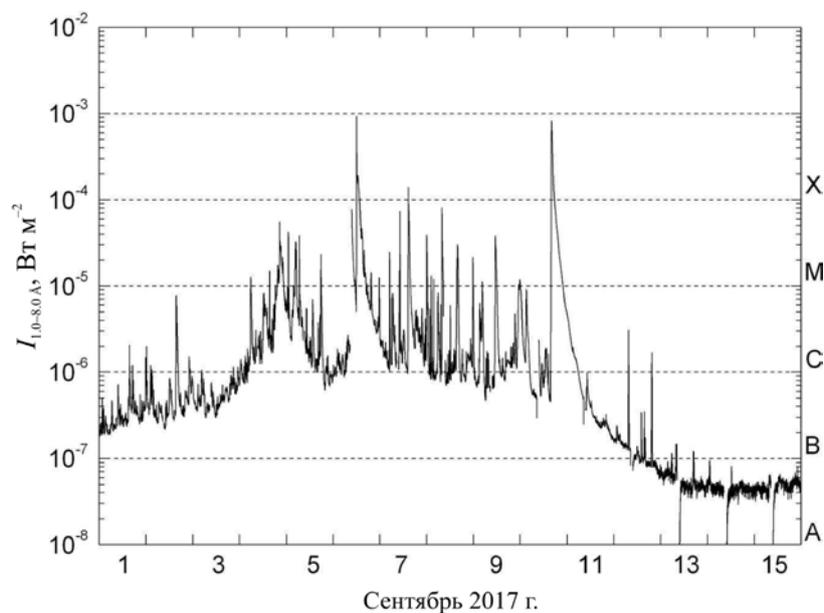


Рис. 3. Зависимость потока рентгеновского излучения Солнца в диапазоне 1–8 Å от времени в первой половине сентября 2017 г. по наблюдениям на космическом аппарате GOES-15. Справа по оси ординат приведена общепринятая шкала баллов рентгеновских вспышек, соответствующих наблюдаемому рентгеновскому потоку

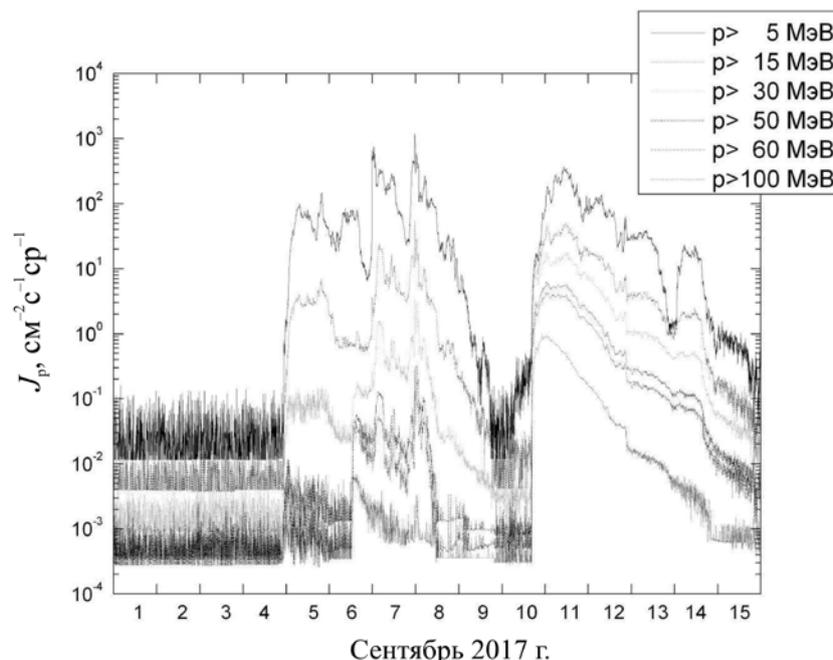


Рис. 4. Изменение интегральных потоков протонов различных энергий, зарегистрированных космическим аппаратом GOES-15 во время вспышек СКЛ в сентябре 2017 г. В верхней части рисунка указаны средние энергии частиц, регистрируемых на шести различных интегральных энергетических каналах прибором EPAD (Electron, Proton, Alpha Detector)



Рис. 5. Зависимость *Dst*-индекса геомагнитной возмущенности от времени [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html]

ных счетчиках основана на тройных совпадениях, а телескопами SMT — на двойных [Стародубцев и др., 2016, 2017]. Для всего комплекса приборов проведены расчеты приемных характеристик (приемных векторов), учитывающих их геометрию, траектории частиц в магнитном поле Земли, влияние атмосферы и вид спектра первых двух угловых моментов функции распределения КЛ. Спектрограф КЛ работает в непрерывном режиме одноминутной и одночасовой регистрации. Параметры приемных характеристик спектрографа и данные текущей регистрации интенсивности КЛ доступны для всех заинтересованных пользователей посредством интерактивных запросов на сайте Института [<http://www.ysn.ru/ipm>; <http://www.ysn.ru/smt>]. Информация обеих станций КЛ обеспечивает получение детальных сведений о состоянии межпланетной среды, понижениях Форбуша, наземных возрастаниях СКЛ и анизотропии галактических космических лучей (ГКЛ), а также позволяет решать прикладные научные задачи, связанные с проявлениями космической погоды на Земле.

НАЗЕМНОЕ ВОЗРАСТАНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ 10 СЕНТЯБРЯ 2017 г. (GLE72)

В сентябре 2017 г. (10.09.2017) в 16:06 UT в активной области AR 12673, имевшей к этому времени координаты S08W83, на Солнце произошла вспышка балла X8.2 — одна из самых мощных в 24 цикле солнечной активности. Вспышка сопровождалась корональным выбросом типа гало, причем соответствующая скорость ударной волны составила около 2900 км/с [<http://www.stce.be/newsletter/pdf/2017/STCEnews20170915.pdf>]. Примерно через 20–25 мин после ее начала на геостационарном космическом аппарате GOES-15 было зарегистрировано возрастание потока СКЛ (рис. 6). Заметим, что в отличие некоторых других событий, например 28 октября 2003 г. (GLE65) [Крымский и др., 2008], по данным космических аппаратов GOES-13 и -15 в низкоэнергичной части спектра (канал регистрации 0.7–4 МэВ) не было отмечено возрастания солнечных частиц. Данное событие наблюдалось только при энергиях выше

4–9 МэВ [<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan>]. Практически в это же время, в 16:30 UT, данные нейтронных мониторов станций Якутск и Тикси показали наземное возрастание интенсивности СКЛ (GLE72) (рис. 7). При этом зарегистрированная амплитуда возрастания на станции Якутск несколько больше, чем в Тикси, несмотря на то, что порог геомагнитного обрезания R_c в Якутске (1.65 ГВ) больше, чем в Тикси (0.48 ГВ) (рис. 7, белая линия). Это обусловлено толстым бетонным перекрытием на ст. Тикси.

Привлечение наряду с данными прямых измерений данных мировой сети станций нейтронных мониторов [<http://www.nmdb.eu>] позволило установить спектр события в широком диапазоне энергий от единиц МэВ до единиц ГэВ, а также проследить динамику спектра СКЛ для этого события. Для этого, кроме данных Якутска и Тикси, мы использовали измерения на станциях КЛ с различными геомагнитными порогами обрезания, на которых было зарегистрировано возрастание потока солнечных частиц: Терра Адели (0.01 ГВ), Туле (0.30 ГВ), Форт Смит (0.30 ГВ), Апатиты (0.65 ГВ), Оулу (0.81 ГВ), Кергелен (1.14 ГВ), Магадан (2.10 ГВ) и Иркутск (3.64 ГВ). Расчеты энергетических спектров события проводились по разработанной в ИКФИА СО РАН методике, подробно описанной в работе [Крымский и др., 2015].

В результате ее применения установлено, что в области релятивистских энергий спектр можно описать степенной функцией вида $J(E) \sim E^{-\gamma}$, где J — поток протонов, E — их энергия, γ — показатель спектра. В этом случае для моментов времени 18 и 19 UT показатель спектра $\gamma \approx 4.5$, а для 20 и 21 UT он смягчается до значения ≈ 5.0 , далее опять становится более жестким (≈ 4.0). В качестве примера на рис. 8 приведен наблюдаемый спектр СКЛ в 18:00 UT. На нем в соответствии с данными измерений на космическом аппарате GOES-15 и наземной сети нейтронных мониторов точечными прямыми линиями показаны аппроксимации двух участков спектра простой степенной функцией. Видно, что в двух различных областях энергий спектр характеризуется разными значениями показателя γ , причем при релятивистских энергиях спектр становится значительно более мягким. Это вполне согласуется с результатами работ различных авторов (например, [Ныммик, 2011] и ссылки в ней). Однако в этом случае возникает вопрос о механизме генерации частиц, который смог бы сформировать такой спектр. В этом вопросе до сих пор нет ясности. С другой стороны, известно, что весь наблюдаемый спектр, включающий в себя прямые измерения потоков СКЛ на космических аппаратах, описывается функцией более сложного вида $J(E) = J_0 E^{-\gamma} \exp(E/E_0)$ [Ellison, Ramaty, 1985; Lovell et al., 1998]. Такой спектр естественным образом устанавливается при ускорении частиц на фронтах ударных волн в нижней короне Солнца. Соответствующая этому квазилинейная теория регулярного ускорения СКЛ детально разработана и подробно описана в работе [Бережко, Танеев, 2013].

Действительно, весь наблюдаемый в 18:00 UT 10 сентября энергетический спектр СКЛ удается удовлетворительно описать аппроксимирующей

функцией $J = 3027 E^{-1.99} \exp(-E/729 \text{ МэВ})$ (рис. 8). С учетом отмеченного выше факта регистрации быстрого КВМ во время вспышки можно предположить, что в данном случае генерация СКЛ обусловлена ускорением частиц на фронте корональной ударной волны. Однако только соответствующие модельные расчеты и их сравнение с экспериментом могут это подтвердить [Бережко, Танеев, 2013; Крымский и др., 2015].

Заметим также, что, несмотря на меньший порог геомагнитного обрезания в Якутске по сравнению с другими станциями, где наблюдалось возрастание потока солнечных частиц, мюонные телескопы спектрографа КЛ это событие не зарегистрировали даже на уровне 0 м в.э. Это обстоятельство обусловлено тем, что максимум коэффициентов связи для вертикального направления приходится на высокие энергии ($>10 \text{ ГэВ}$), а для энергий 2–3 ГэВ их значения уменьшаются более чем на два порядка величины [Стародубцев и др., 2016].

ПРОГНОЗ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 7 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

С целью прогноза геомагнитной возмущенности в ИКФИА СО РАН с 2013 г. на основе измерений интенсивности КЛ постоянно ведется мониторинг космической погоды. Прогноз проводится в реальном времени с использованием 1-часовых данных измерений мировой сети нейтронных мониторов [<http://www.nmdb.eu>]. Он основан на расчетах трехмерной анизотропии ГКЛ с помощью метода глобальной съемки [Григорьев и др., 2017; Grigoryev, Starodubtsev, 2015; Grigoryev et al., 2013].

На рис. 9 приведены результаты прогноза геомагнитной бури, зарегистрированной 7 сентября 2017 г. Рисунок создан в результате автоматического расчета параметров анизотропии КЛ в 08:32 по местному якутскому времени 7 сентября, что соответствует 23:32 UT 6 сентября 2017 г. На основе характерного поведения компонент суточной анизотропии КЛ, описанного в работах [Grigoryev, Starodubtsev, 2015; Grigoryev et al., 2013], 6 сентября нами был дан прогноз ожидаемого начала геомагнитной бури. Прогноз автоматически вырабатывается в случаях, если амплитуды достигают значений $A_x > 0.5 \%$ и $A_z > 0.5 \%$ или $A_y > 0.5 \%$ и $A_z > 0.5 \%$. Это показывает надпись внизу, которая существует на экране только в течение суток, после чего исчезает. Действительно, в данном случае в конце 7 сентября 2017 г. мировой сетью магнитометров была зарегистрирована интенсивная магнитная буря (см. рис. 5) и форбуш-понижение в интенсивности КЛ (рис. 10).

Отметим, что достоверность прогноза геомагнитных бурь с $Dst < -50 \text{ нТл}$ составляет около 70 %, а его текущие результаты доступны на [http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html].

ИЗМЕРЕНИЯ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Меридиональная сеть ИКФИА СО РАН состоит из шести пунктов наблюдения на территории Якутии

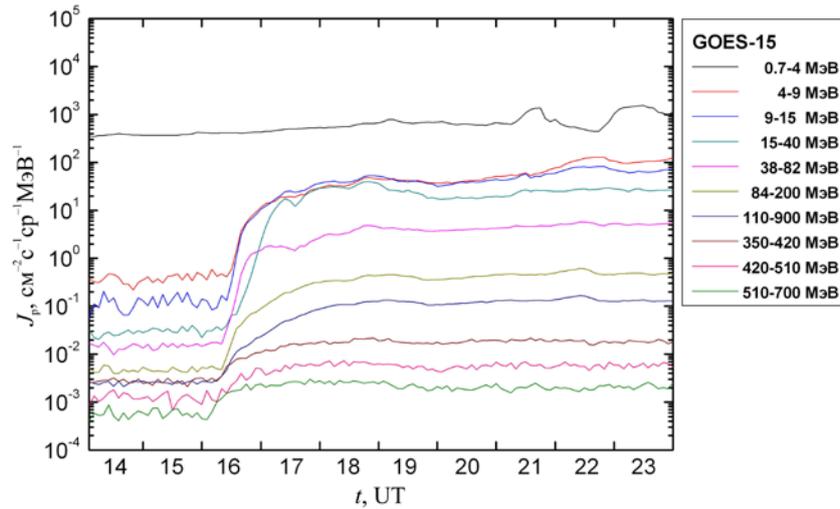


Рис. 6. Изменение дифференциальных потоков протонов различных энергий, зарегистрированных космическим аппаратом GOES-15 во время вспышки СКЛ 10 сентября 2017 г. Указаны интервалы энергии частиц, которые регистрируются в десяти различных дифференциальных энергетических каналах приборами TELESCOPE (P1-P3), DOME (P4-P7) и NEPAD (P8-P10). Подробное описание см. на сайте [[ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan/README](http://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan/README)]

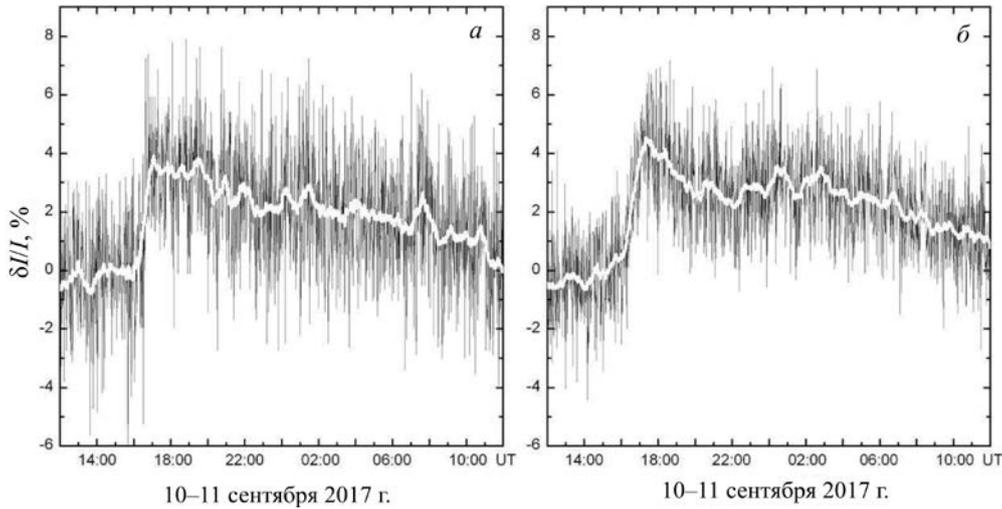


Рис. 7. Зависимость интенсивности КЛ от времени во время GLE72 по данным нейтронного монитора станций Бухта Тикси (а) и Якутск (б). Белая линия — сглаженные данные

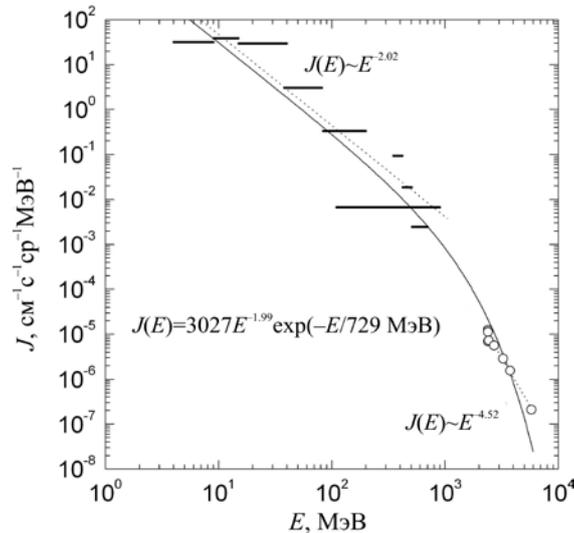


Рис. 8. Зависимость потока СКЛ в 18:00 UT 10 сентября 2017 г. от энергии частиц во время GLE72. Горизонтальными отрезками отмечены девять дифференциальных каналов измерений потоков протонов на GOES-15, открытыми кружками — измерения нейтронных мониторов

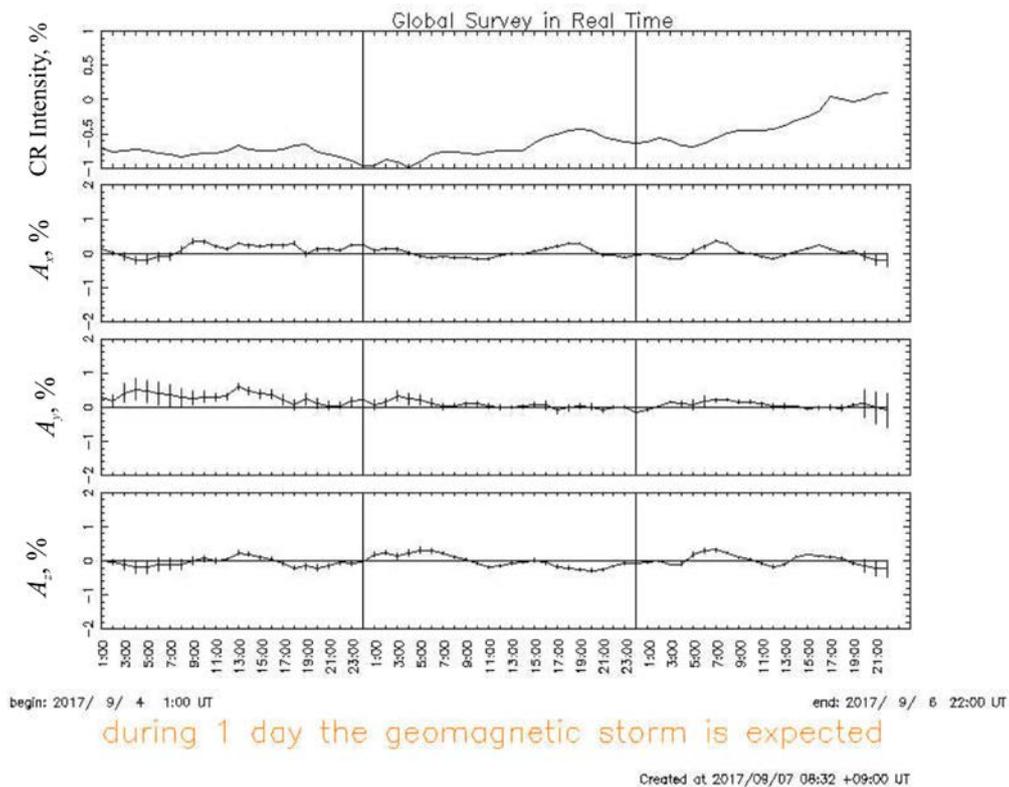


Рис. 9. Зависимость изотропной интенсивности и компонент анизотропии КЛ (в системе координат GSE) от времени, рассчитанных с помощью метода глобальной съемки для периода времени 01:00 UT 4 сентября — 22:00 UT 6 сентября 2017 г.

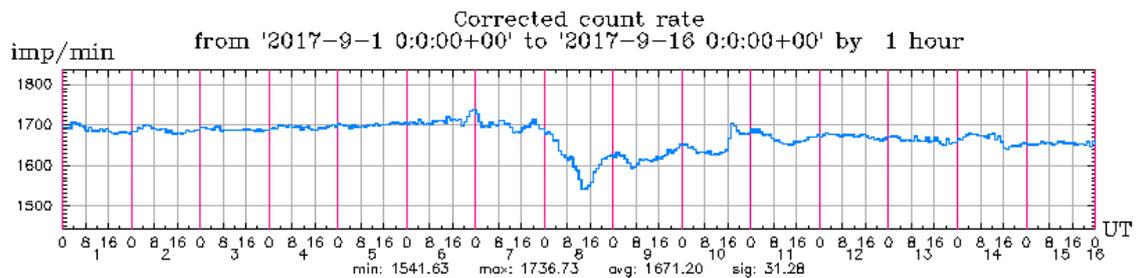


Рис. 10. Зависимость исправленной на давление интенсивности КЛ от времени по измерениям нейтронного монитора ст. Якутск в сентябре 2017 г. Цифры внизу означают вычисленные с помощью агрегатных функций базы данных PostgreSQL на основе 1-минутных данных минимальное и максимальное значения интенсивности КЛ, ее среднее значение и стандартное отклонение для показанного интервала времени (рисунок является результатом интерактивного запроса на <http://www.ysn.ru/ipm>)

и является единственной в России, обеспечивающей магнитные наблюдения в авроральной и субавроральной зонах в широтном и долготном разрезах. В области исследования магнитного поля Земли и магнитных возмущений ИКФИА СО РАН активно участвует в международных проектах INTERMAGNET [<http://www.intermagnet.org>] и MAGDAS [<http://magdas2.serc.kyushu-u.ac.jp/station/index.html>].

В рамках международного проекта MAGDAS феррозондовые магнитометры MAGDAS-9 расположены вдоль 190° – 210° магнитных меридианов на о. Котельный ($76^{\circ}00'$ N, $137^{\circ}54'$ E), в ПГО Тикси ($71^{\circ}36'$ N, $128^{\circ}47'$ E), Чокурдах ($70^{\circ}37'$ N, $147^{\circ}55'$ E), Зырянка ($65^{\circ}44'$ N, $150^{\circ}52'$ E), Жиганск ($66^{\circ}48'$ N, $123^{\circ}22'$ E) и Якутске ($61^{\circ}57'$ N, $129^{\circ}39'$ E) [Баишев и др., 2013]. В рамках проекта INTERMAGNET измерения магнитного поля Земли проводятся только в обсерватории Якутск и осуществляются с помо-

щью цифровой магнитометрической системы «ИНТЕРМАГНЕТ» [Моисеев и др., 2011].

ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЯКУТСКЕ

На рис. 11 приведены результаты наблюдений значений полного вектора напряженности магнитного поля \mathbf{F} и его проекций в магнитной обсерватории Якутск для интервала времени 1–15 сентября 2017 г. Проекция этого вектора на ось X называется северной составляющей (H_x), с направлением на северный географический полюс, проекция H_y на ось Y — восточной составляющей (H_y), а на ось Z — вертикальной составляющей (H_z). Измерения проводились с помощью 3-компонентного феррозондового магнитометра (модель FGE DMI, Дания). Из рис. 11 следует, что в этот период времени в Якутске были

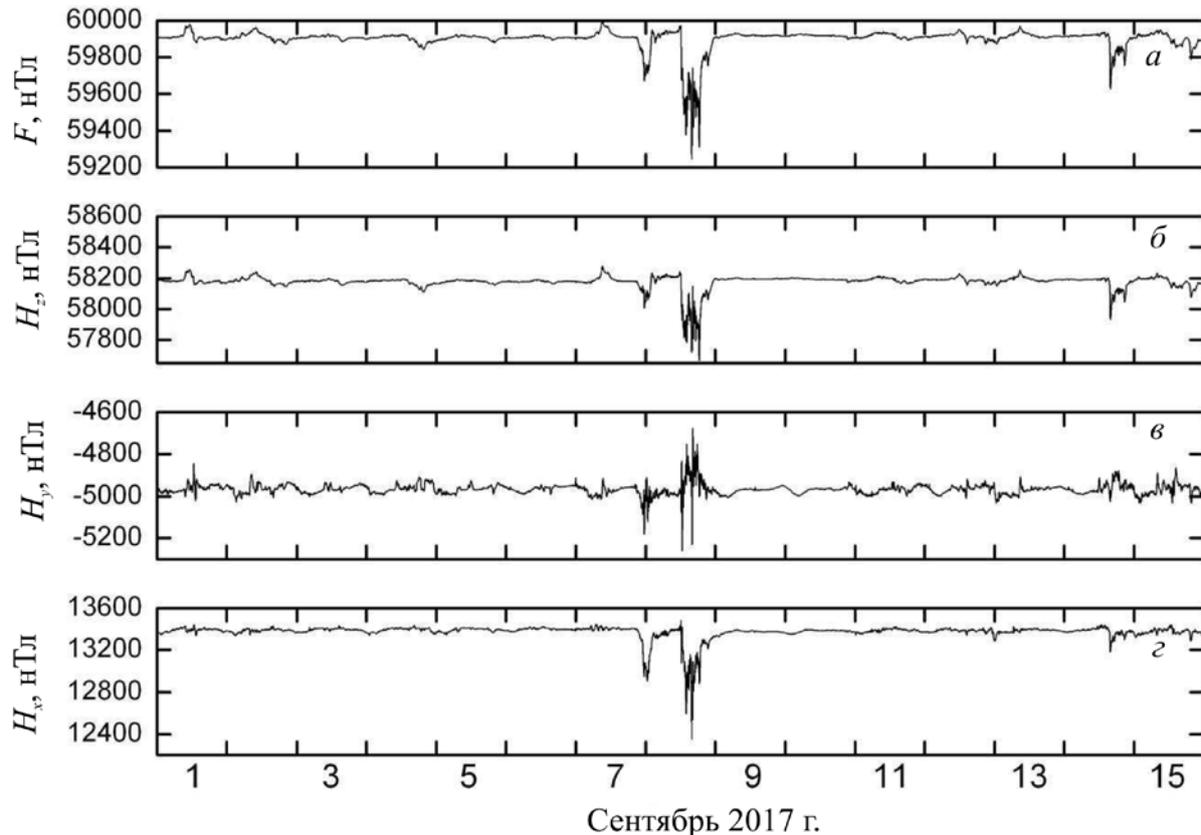


Рис. 11. Зависимость значений полного вектора напряженности магнитного поля \mathbf{F} (а) и его проекций H_z , H_y и H_x (б–г) от времени в первой половине сентября 2017 г. по измерениям магнитной обсерватории Якутск

зарегистрированы три магнитных возмущения разной интенсивности — 7, 8 и 14 сентября. Ранее упомянутая магнитная буря 13 сентября в Якутске не наблюдалась. Однако магнитные бури 7 и 8 сентября, скорее всего, являются проявлением одной интенсивной бури, имеющей сложную структуру (см. рис. 5).

Изменения в спектрах флуктуаций магнитного поля Земли как в данных наземных обсерваторий, так и на геостационарных космических аппаратах перед солнечными протонными событиями неоднократно отмечались многими исследователями [Cheng, 1991; Kobrin et al., 1985]. Поэтому определенный интерес представляет прослеживание динамики спектров флуктуаций полного вектора напряженности магнитного поля \mathbf{F} в Якутске во время событий в сентябре 2017 г. Это тем более важно, что возмущенность земного магнитного поля определяется состоянием космической погоды, исследования которой в настоящее время актуальны. Для более детального анализа и установления возможных причин ожидаемых динамических изменений в спектрах флуктуаций магнитного поля, наряду с 1-минутными данными измерений магнитной обсерватории Якутск, мы привлекли одномоментные данные измерений магнитного поля и параметров плазмы солнечного ветра (СВ), представленные в известной базе данных OMNI [<https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html>]. Нужно заметить, что в ней уже проведена операция временного сдвига к носу отошедшей земной ударной

волны и поэтому остается лишь учесть время распространения возмущения от этой точки до места регистрации магнитного поля, которое составляет малую величину порядка минуты. При расчете спектральных характеристик длина реализации выбиралась равной 1 сут, а для определения самих спектров флуктуаций использовался стандартный метод Блэкмена—Тьюки с применением корреляционного окна Тьюки [Blackman, 1958].

В качестве примера на рис. 12 представлены спектры мощности флуктуаций полного вектора напряженности магнитного поля магнитосферы Земли \mathbf{F} , измеренного в магнитной обсерватории Якутск, и модуля межпланетного магнитного поля B для отдельных интервалов времени 3, 6, 8 и 15 сентября 2017 г. Первый интервал соответствует спокойному периоду в геомагнитном поле, второй — периоду, предшествующему возмущению, третий — непосредственно магнитной буре, четвертый — периоду, следующему за небольшим и коротким возмущением геомагнитного поля в Якутске. При анализе спектров флуктуаций магнитного поля обращает на себя внимание следующее: 1) спектры весьма динамичны — их мощность в зависимости от периода наблюдений изменяется на порядки величин; 2) спектры флуктуаций земного магнитного поля более мягкие — их показатель как минимум на единицу больше соответствующего показателя межпланетного магнитного поля; 3) наиболее изменчива низкочастотная часть спектров — мощ-

ность флуктуаций в ней может изменяться на несколько порядков величины, в то время как в высоко-частотной части она едва меняется на один порядок.

Более детальный анализ ежесуточных спектров флуктуаций за весь изучаемый период времени показывает, что их наиболее выраженные изменения происходят на фоне динамических изменений потоков СКЛ и параметров СВ. Однако отметим, что не все межпланетные возмущения находят свой отклик в геомагнитном поле — такой, как геомагнитные бури (рис. 13). Для понимания этого необходимо принимать во внимание и геометрию пересечения Землей различного рода крупномасштабных возмущений СВ и уровень МГД-турбулентности в их окрестности [Plotnikov et al., 2014; Shadrina, Starodubtsev, 2016a, b; Shadrina et al., 2012, 2014]. Но для установления природы спектров флуктуаций геомагнитного поля требуются дальнейшие систематические исследования во время наблюдения других магнитных бурь с привлечением данных прямых измерений параметров среды на космических аппаратах и геостационарных спутниках. Таким образом, в результате совместного анализа рис. 11–13 можно сделать вывод, что динамические изменения спектров флуктуаций магнитного поля F определяются главным образом состоянием межпланетной среды (космической погоды) на орбите Земли.

АНАЛИЗ СОБЫТИЯ 7–8 СЕНТЯБРЯ 2017 г.

Отдельный интерес представляет более подробное исследование геомагнитных измерений на Якутском меридиане 7 и 8 сентября 2017 г., когда наблюдалась интенсивная геомагнитная буря (см. рис. 5). Для этого мы использовали 1-минутные данные измерений в Якутске (исправленные геомагнитные широта $\Phi' = 56.3^\circ$ N и долгота $\Lambda' = 201.0^\circ$ E), Жиганске ($\Phi' = 61.4^\circ$ N, $\Lambda' = 194.4^\circ$ E) и Тикси ($\Phi' = 66.0^\circ$ N, $\Lambda' = 197.5^\circ$ E). На рис. 14, 15 показаны горизонтальная H и вертикальная Z компоненты геомагнитного поля, измеренные на этих станциях 7 и 8 сентября 2017 г., если отсчитывать даты по мировому времени. Измерения проводятся трехкомпонентными феррозондовыми магнитометрами типа MAGDAS-9. Из рис. 14 следует, что максимальные положительное и отрицательное отклонения H -компоненты геомагнитного поля в Тикси превысили абсолютную величину 500 нТл, а в Жиганске — 400 и 900 нТл. Анализ рис. 14 приводит к выводу, что 7 сентября 2017 г. развилась интенсивная эквивалентная 2-вихревая токовая система с авроральными восточной электроструей в вечернем секторе (16:00–22:00 MLT) и западной электроструей в позднем утреннем секторе (05:00–08:00 MLT). Как показывают изменения H - и Z -компонент поля, восточная и западная электроструи располагались между Тикси и Жиганском примерно на широтах между $\Phi' \approx 62$ – 64° N.

Изменения H - и Z -компонент геомагнитного поля на трех станциях 8 сентября 2017 г., приведенные на рис. 15, отражают эффекты токов западного направления в дополуночном секторе (08:00–10:45 MLT)

(продолжение западной электроструи предыдущего дня) и полуночном и раннем утреннем секторе (20:00–06:00 MLT). Вполне вероятно, что электроструя, зарегистрированная во втором секторе, является усиленной и перемещенной в сторону полуночных часов, а также в южном направлении западной электроструей предыдущего дня. Видно, что максимальные отрицательные отклонения H -компоненты в дополуночном секторе в Тикси достигали 600 нТл и в Жиганске — 1200 нТл, а в полуночном и раннем утреннем секторе в Тикси они превысили 850 нТл и в Жиганске — 1350 нТл. Как показывают вариации H - и Z -компонент геомагнитного поля, электроструя располагалась южнее Жиганска, но севернее Якутска примерно на $\Phi' \approx 59^\circ$ N.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

На радиофизическом полигоне ИКФИА СО РАН Ойбенкель ($61^\circ 55'$ N, $129^\circ 21'$ E), расположенном в нескольких десятках километров от Якутска вдали от промышленных помех, с 2017 г. проводится измерение величины электрических потенциалов. Электротеллурические измерения проводятся по стандартной схеме [Кролевец, Копылова, 2003], которая заключается в регистрации разности потенциалов между двумя парами вкопанных в землю электродов, так называемых измерительных линий, ориентированных в направлениях север—юг (С—Ю) и восток—запад (В—З). Две пары измерительных линий длиной 100 м каждая ориентированы в этих направлениях. Далее на основе этих измерений вычисляется напряженность электротеллурического поля E .

ВАРИАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ В ЯКУТСКЕ И ИХ СВЯЗЬ С ВОЗМУЩЕНИЯМИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Представляет интерес проведение сравнительного анализа параметров составляющих магнитного поля и электрических потенциалов. Рассмотрим более подробно поведение естественных потенциалов в период развития кольцевого тока (КТ) 8 сентября 2017 г.

Вариации одночасовых значений Dst -индекса геомагнитной активности во время этой бури приведены на рис. 16. Наибольшие значения магнитных возмущений в этой буре $Dst = -142$ нТл наблюдались в 02 UT (первое усиление КТ) и в 14–18 UT, когда Dst изменялся в диапазоне $-120 \div -142$ нТл (второе усиление КТ). С 12 до 19 UT нами наблюдались вариации E до 40 мВ/100 м. Вариации геомагнитных колебаний в X - и Y -компонентах, измеренных на геофизическом приборе ADU-07, установленном на радиофизическом полигоне Ойбенкель, и вариации естественных потенциалов E , измеренные через 100 м на том же приборе, показаны на рис. 17.

Выделенный временной период существования больших пульсаций, как в магнитных составляющих, так и в естественных электрических потенциалах, показан на рис. 18, 19.

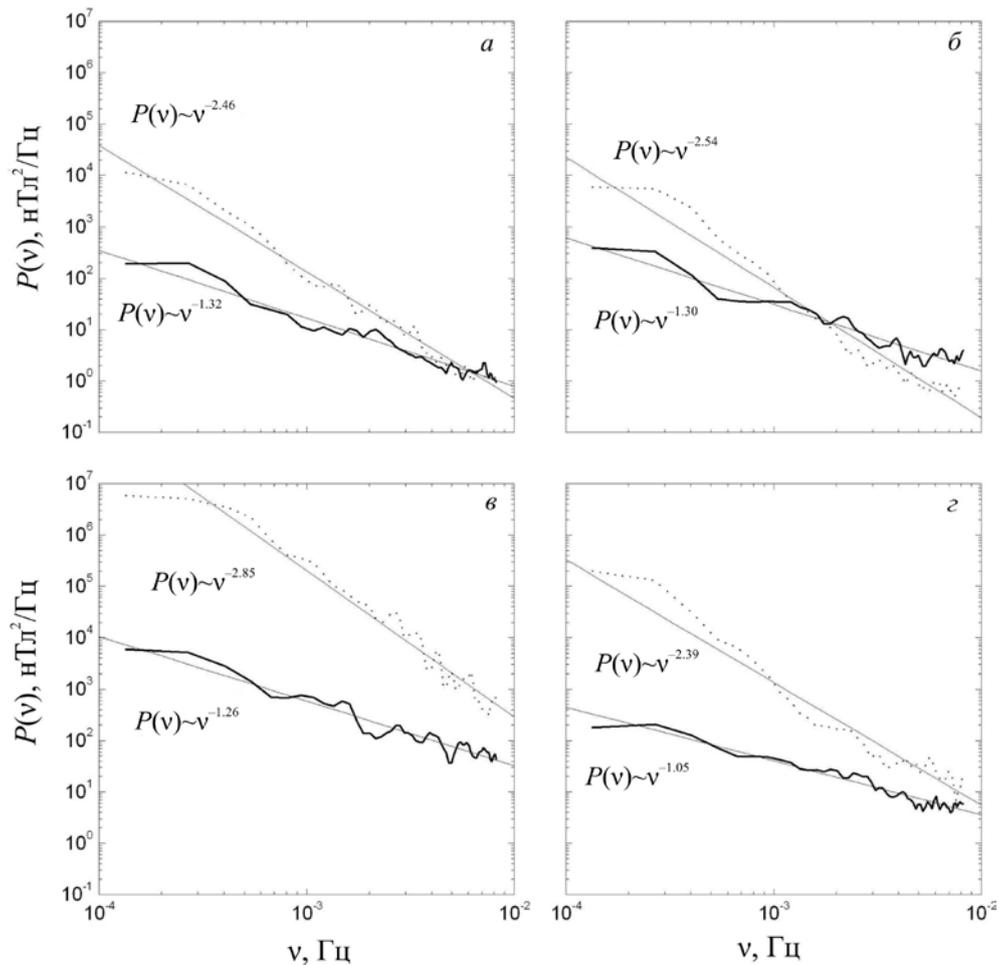


Рис. 12. Зависимость от частоты мощности флуктуаций полного вектора напряженности магнитного поля \mathbf{F} по измерениям магнитной обсерватории Якутск (пунктирная кривая) и модуля межпланетного магнитного поля B по измерениям на основе базы данных OMNI для 3 (а), 6 (б), 8 (в) и 15 (г) сентября 2017 г. Сплошными линиями показана аппроксимация спектров флуктуаций степенной функцией

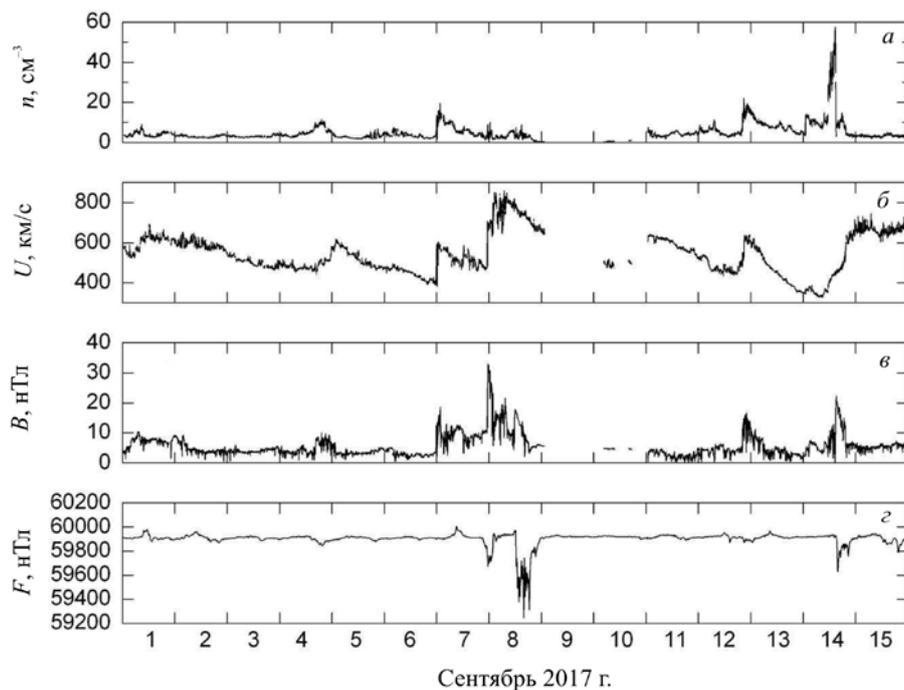


Рис. 13. Зависимость значений плотности n (а) и скорости U (б) солнечного ветра, модуля межпланетного магнитного поля B (в), а также полного вектора напряженности магнитного поля \mathbf{F} (г) в Якутске от времени в первой половине сентября 2017 г.

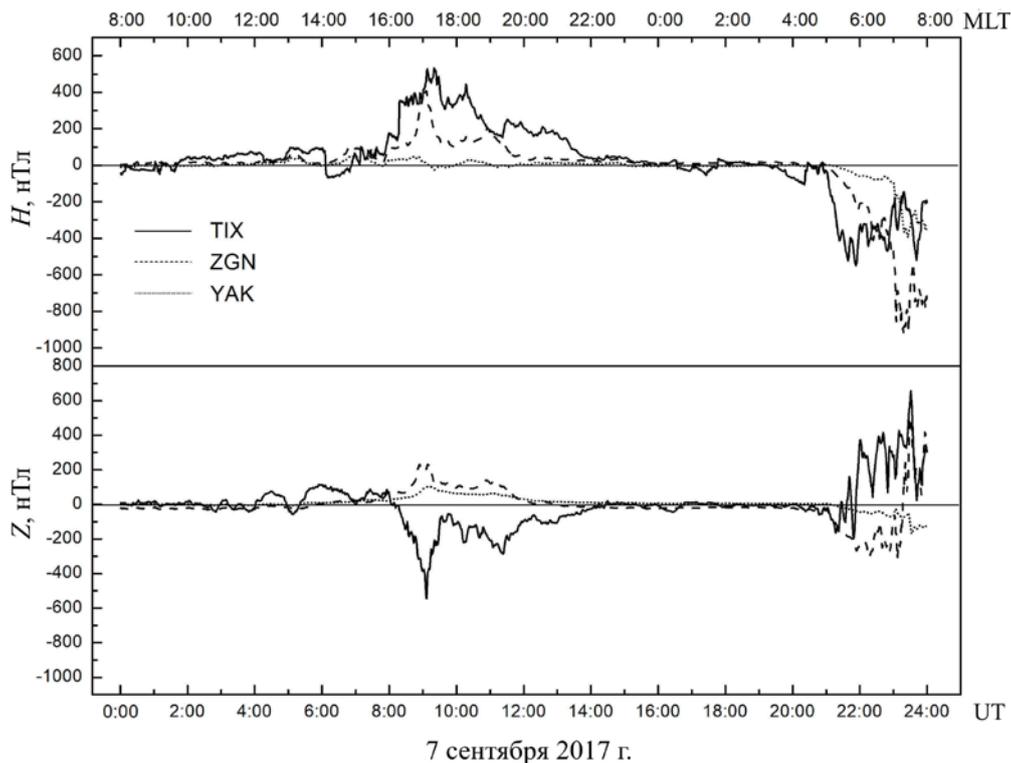


Рис. 14. Вариации горизонтальной (H) и вертикальной (Z) компонент геомагнитного поля в Якутске, Жиганске и Тикси 7 сентября 2017 г.

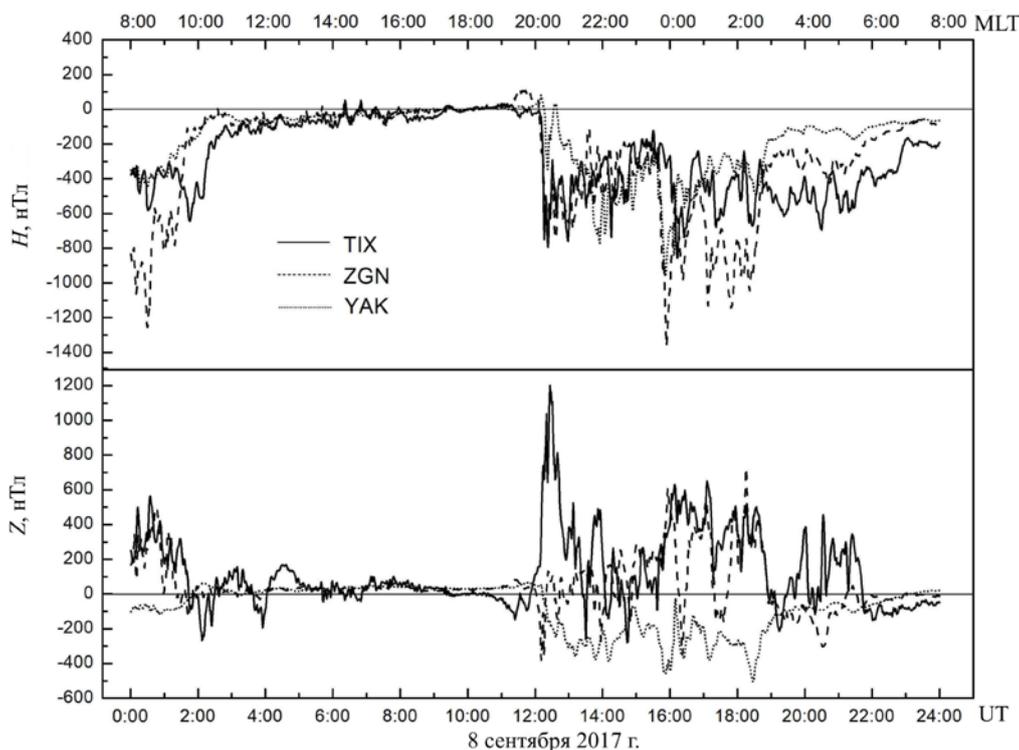


Рис. 15. То же 8 сентября 2017 г.

Во время магнитной бури 8 сентября 2017 г. с 12 до 20 ч UT (ночь по местному Якутскому времени) наблюдались иррегулярные пульсации в широком диапазоне периодов — от $Pi3$ ($T > 150$ с) до $Pi1$ ($T = 1 \div 40$ с). Спектрограммы вариаций магнитных составляющих во время усиления кольцевого тока 8 сентября 2017 г. показаны на рис. 19. Спектрограммы вариаций С—Ю и В—З составляющих вектора E во время второго усиления КТ 8 сентября

2017 г. приведены на рис. 20. Отметим, что в вариациях E , построенного по С—Ю и В—З составляющим, особенно хорошо проявляется иррегулярная форма колебаний с меняющейся верхней частотой диапазона, характерная для иррегулярных колебаний $Pi1$ [Клейменова, 2007].

Коэффициент корреляции между разностью естественных потенциалов E_{C-Y} , E_{B-Z} и соответствующими магнитными составляющими X и Y во

время пульсаций, длящихся 8.33 ч во временном интервале 12–20 UT во время второго усиления КТ 8 сентября 2017 г. составляет $\rho(E_{C-10}, Y) = 0.77 \pm 0.1$ на уровне значимости $\alpha < 0.005$ и $\rho(E_{B-3}, X) = 0.65 \pm 0.1$ ($\alpha < 0.005$). Диапазон изменения $\rho(E_{C-10}, Y) = 0.5 \div 0.9$ и $\rho(E_{B-3}, X) = 0.52 \div 0.9$. По литературным данным коэффициент корреляции между вариациями геомагнитного поля и земными токами равен 0.833 [Александров и др., 1972]. Днем средние амплитуды естественных потенциалов E и микропульсаций магнитного поля H в диапазоне 0–500 нТл связаны соотношением E (мкВ/км) $\sim H$ (нТл) [Hessler, Wescott, 1959].

Таким образом, можно сделать вывод, что на радиофизическом полигоне Ойбенкель во время магнитной бури 8 сентября 2017 г. с 12 до 20 ч UT, что соответствует ночи по местному Якутскому времени, в широком диапазоне периодов наблюдались иррегулярные пульсации — от $Pi3$ до $Pi1$. При этом они сопровождались вариациями естественных потенциалов электротеллурического и геомагнитного полей с коэффициентом корреляции между ними $\rho(E, H) = 0.5 \div 0.9$ на уровне значимости $\alpha < 0.005$.

РЕГИСТРАЦИЯ РАДИОШУМА И СИГНАЛОВ РАДИОСТАНЦИЙ ОНЧ-ДИАПАЗОНА

С 2009 г. в ИКФИА СО РАН проводится регистрация сигналов радионавигационной системы РСДН-20 [Каримов и др., 2012]. Передатчики расположены вблизи Новосибирска ($55^{\circ}45' N$, $82^{\circ}27' E$), Краснодара ($45^{\circ}24' N$, $38^{\circ}9' E$) и Хабаровска ($50^{\circ}4' N$, $136^{\circ}36' E$) и излучают радиоимпульсы в ОНЧ-диапазоне ($\nu = 3 \div 30$ кГц). Регистрируются радиосигналы на частотах 11.904, 12.649 и 14.881 кГц. На этих частотах в период паузы между излучением радиоимпульсов радиостанций проводится еще регистрация интенсивности радиошума. Радиосигнал принимается на электрическую штыревую антенну (действующая высота 2 м), а затем после предварительного усиления (коэффициент усиления 32 дБ в полосе частот 0.3–100 кГц) поступает на вход 14-рядного АЦП-USB-3000. Привязка к абсолютному времени и высокостабильная частота дискретизации АЦП, необходимые для регистрации фазы радиосигналов и запуска сбора данных в соответствии с режимом работы РСДН-20, организованы при помощи GPS-часов (Trimble Thunderbolt E). Точность секундного импульса (PPS) составляет $UTC \pm 50$ нс. Относительная нестабильность частоты генератора гармонического сигнала GPS-часов (Trimble Thunderbolt E) $\Delta f/f$ после суток работы не хуже $1.16 \cdot 10^{-12}$ (изменение частоты Δf в пределах 3σ , а номинальная частота $f = 10$ МГц). Внешняя частота дискретизации 2.5 МГц для АЦП получается делением синхронизированного гармонического сигнала GPS-часов (10 МГц). С выхода АЦП сигнал подается на ноутбук со специальной программой регистрации. Длительность окна выборки 2.688 мс определяет частотное разрешение быстрого преобразования Фурье (БПФ) 372 Гц, а также соответствует кратности частот исследуемых радиосигналов. Перед каждым запуском программы формируется таб-

личный массив значений тригонометрических функций для БПФ, что существенно ускоряет процесс расчета амплитуды и фазы для трех частот. Следует отметить, что регистратор ОНЧ-радиосигналов имеет минимальный набор аналоговых функций. Регистрация организована на основе модулей серийного производства, что дает возможность построения измерительного комплекса и облегчает его настройку.

Аналогичная регистрация с 2015 г. организована в ПГО Тикси. Это позволило существенно повысить эффективность радиофизического мониторинга.

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

Радиосигналы ОНЧ способны распространяться на большие расстояния в волноводе Земля — ионосфера. Повышение потока рентгеновского излучения во время солнечных вспышек приводит к резкому повышению электронной концентрации в ионосфере, особенно в нижней ее части (D-область, 60–80 км). Такие резкие изменения вызывают внезапные фазовые (ВФА) и амплитудные (ВАА) аномалии и при распространении электромагнитных сигналов ОНЧ-диапазона [Митра, 1977].

Трассы распространения сигналов различных радиостанций, регистрируемых в Якутске и ПГО Тикси, показаны на рис. 21.

Вариации амплитуды и фазы сигналов радиостанции Новосибирск на частоте 11.904 кГц при регистрации в ПГО Тикси и Якутске, а также интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца и значения Dst 4–11 сентября 2017 г. представлены на рис. 22 а–в соответственно. Суточные амплитудно-фазовые вариации радиосигнала при регистрации в невозмущенных геофизических условиях, полученные усреднением значений с 1 по 3 сентября, также показаны на рис. 22, а, б.

Уменьшение фазовой задержки регистрируемого радиосигнала можно трактовать как уменьшение эффективной высоты волновода Земля — нижняя ионосфера, а понижение амплитуды (повышение затухания радиоволн при распространении в волноводе Земля — ионосфера) — как понижение высотного градиента концентрации электронов нижней ионосферы [Kumar, Kumar, 2018]. Вторжения энергичных частиц вызывают повышение электронной концентрации в нижней ионосфере, изменяя условия распространения ОНЧ-радиоволн. Особенностью высокоширотной ионосферы является ее динамичность, обусловленная в большей степени вторжениями корпускулярных потоков, чем вариациями солнечной радиации и ГКЛ — основными источниками ионизации средне- и низкоширотной ионосферы [Белоглазов, Ременец, 1982].

Регистрация радиосигналов в Тикси позволяет исследовать динамику высокоширотной ионосферы. С 5 по 9 сентября отмечается повышение затухания и уменьшение фазовой задержки радиосигналов, регистрируемых в Тикси. Так, максимальное понижение

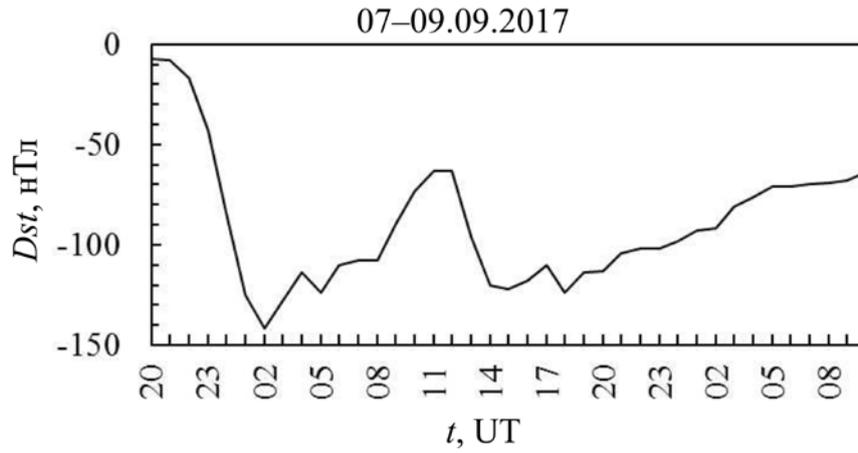


Рис. 16. Вариации *Dst*-индекса во время большой магнитной бури 7–8 сентября 2017 г.

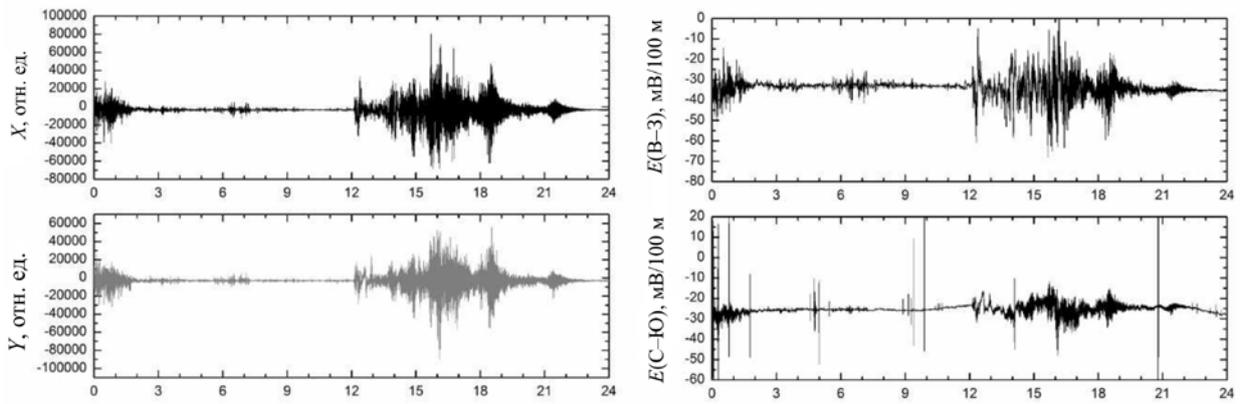


Рис. 17. Вариации магнитных составляющих и естественных потенциалов во время усиления КТ 8 сентября 2017 г.

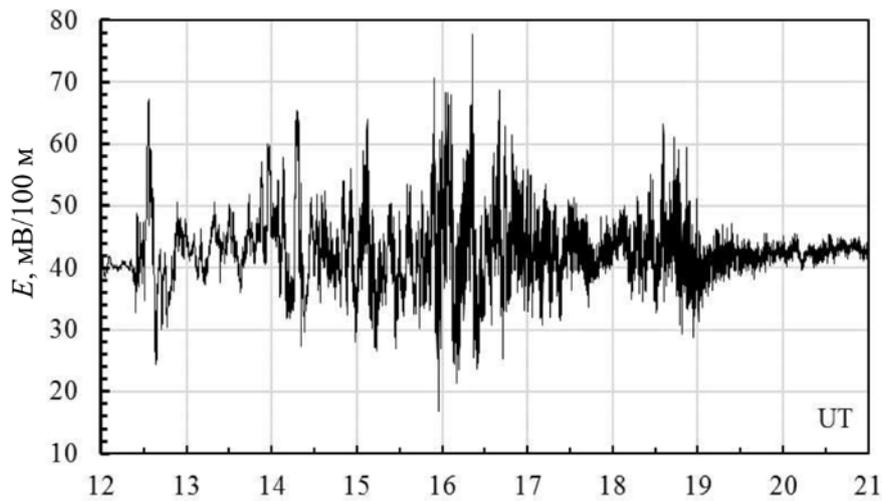


Рис. 18. Вариации вектора *E*, построенного по составляющим С—Ю и В—З, во время второго усиления КТ 8 сентября 2017 г.

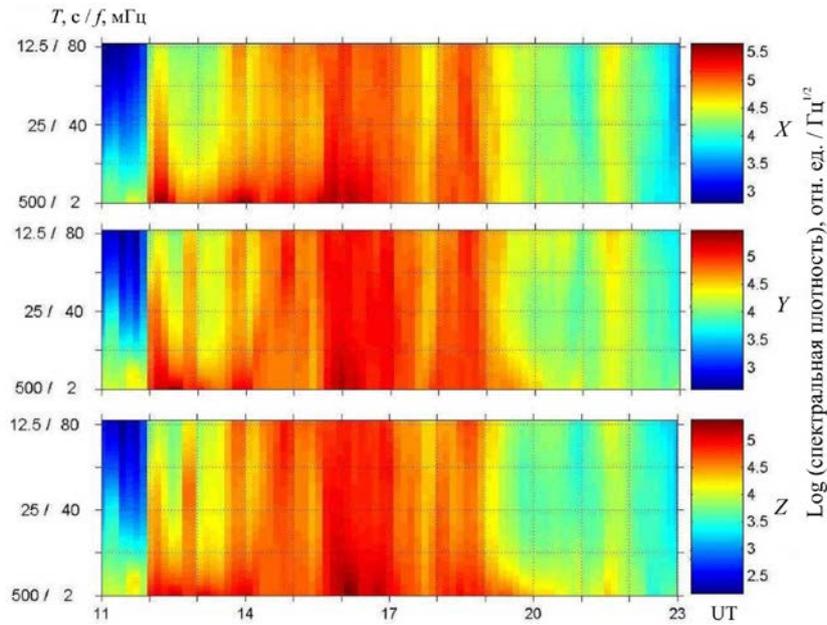


Рис. 19. Спектрограммы вариаций магнитных составляющих во время усиления КТ 8 сентября 2017 г. Время указано в часах с начала суток

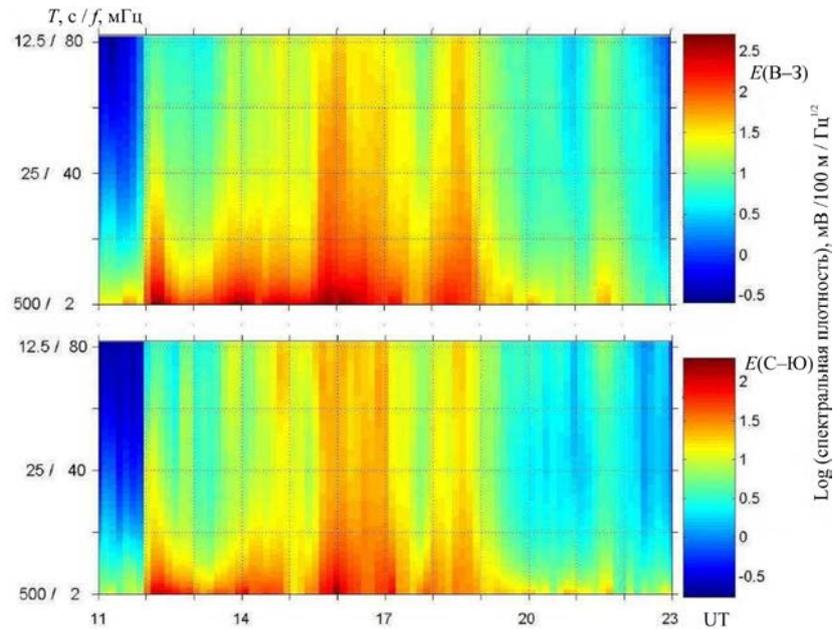


Рис. 20. Спектрограммы вариаций составляющих С—Ю и В—З вектора E во время второго усиления КТ 8 сентября 2017 г. Время указано в часах с начала суток



Рис. 21. Трассы распространения ОНЧ-сигналов радионавигационных станций

амплитуды сигнала «Новосибирск» 8 сентября составило 5 дБ, а уменьшение фазовой задержки — 45° днем и 55° ночью. Следует отметить также понижение фазовой задержки на 75° ночью 10 сентября 2017 г. Такие изменения параметров ОНЧ-радиосигнала характеризуют появление дополнительного источника ионизации — высыпаний энергичных протонов в высокоширотную область ионосферы [Белоглазов, Ремец, 1982; Silber, Price, 2017]. Отмеченные временные интервалы совпадают с повышением интегральных потоков протонов (см. рис. 4).

Часть электронов внутренних L -оболочек (L — параметр Мак-Илвейна) во время магнитной бури вследствие питч-угловой диффузии попадает в конус потерь, что провоцирует высыпания из радиационных поясов Земли в ионосферу уже на геомагнитных широтах 50°–72°. Вариации параметров ОНЧ-сигналов весьма чувствительны к таким событиям [Rodger et al., 2012]. Эффект магнитной бури проявился 8 сентября в амплитудно-фазовых вариациях ОНЧ-сигналов, регистрируемых в Якутске. Уменьшение фазовой задержки 8 сентября в ночных условиях составило 50° при $Dst=120$ нТл, а в дневных условиях 9 сентября — 30°.

Уменьшение на 30° фазовой задержки зарегистрированного в Якутске сигнала «Новосибирск» в дневных условиях 11 сентября вызвано резким повышением потоков энергичных протонов 10–11 сентября (см. рис. 4). Всплеск протонов начался в 17–18 UT 10 сентября, когда на рассматриваемых трассах были уже ночные условия, поэтому всплеск проявился только следующим днем, а с середины 11 сентября передатчики прекратили работу.

Эффекты рентгеновских вспышек проявились в амплитудно-фазовых вариациях радиосигналов в те периоды, когда трассы распространения проходили на освещенной Солнцем стороне Земли. Наиболее чувствительным параметром ОНЧ-радиосигнала к геофизическим событиям является фаза. Для рассматриваемых трасс это показано в работе [Каримов и др., 2008]. Внезапные фазовые аномалии ОНЧ-сигналов (11.904 кГц), регистрируемые в Тикси и Якутске 6 сентября 2017 г., показаны на рис. 23.

Как уже упоминалось выше, с 4 по 10 сентября на Солнце наблюдался ряд рентгеновских вспышек. Информация о них и о сопровождающих ВФА сигналов радиостанций на частоте 11.904 кГц представлены в табл. 2. Значения ВФА приведены к единице протяженности (1 Мм) радиотрассы. Протяженности радиотрасс Краснодар—Якутск, Новосибирск—Якутск и Хабаровск—Якутск составляют соответственно 5.76, 2.64, 1.34 Мм. Протяженности радиотрасс Краснодар—Тикси, Новосибирск—Тикси и Хабаровск—Тикси составляют 5.32, 2.71, 2.43 Мм.

Для описания зависимости ВФА от потока рентгеновского излучения и зенитного угла Солнца мы использовали эмпирическое модельное выражение [Орлов и др., 1998]:

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

где Φ — изменение фазы сигнала относительно невозмущенного значения, приведенное к единице про-

тяженности радиотрассы (градус/Мм); P — поток рентгеновского излучения в диапазоне 1–8 Å; $\cos X$ — косинус зенитного угла Солнца, усредненный вдоль трассы распространения радиосигнала.

На основе выделенных нами событий ВФА с 4 по 10 сентября при регистрации в Якутске и Тикси ОНЧ-радиосигналов в условиях дневного распространения (табл. 2) методом наименьших квадратов оценены параметры модели (1).

Значения зенитного угла Солнца вдоль трасс распространения по координатам с разрешением 200 км рассчитаны по алгоритму [<http://stjarnhimlen.se/comp/tutorial.html>]. Для трасс Новосибирск—Тикси и Новосибирск—Якутск были рассчитаны среднеквадратичные зависимости ВФА сигнала на 11.904 кГц от потока рентгеновского излучения Солнца. Эти зависимости представлены на рис. 24, а параметры зависимостей для всех рассматриваемых трасс — в табл. 3. Уровень надежности величин параметров, рассчитанный по критерию Фишера, — не ниже 99 %.

Таким образом, с 4 по 10 сентября 2017 г. в амплитудно-фазовых вариациях радиосигналов нами были установлены эффекты, связанные с солнечными рентгеновскими вспышками, магнитной бурей и высыпаниями энергичных протонов. Установлено, что ВФА, вызванная рентгеновскими вспышками, удовлетворительно описывается линейной функцией логарифма произведения потока рентгеновского излучения и усредненного вдоль радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца. Для рассмотренных шести радиотрасс радиостанций ОНЧ-диапазона проведена адаптация параметров этой зависимости, которая в дальнейшем может быть использована для оценки потока вспышечного рентгеновского излучения по регистрируемым вариациям фазы радиосигналов.

В рассматриваемых событиях эффекты магнитной бури проявились в виде повышения затухания и уменьшения фазовой задержки регистрируемых ОНЧ-радиосигналов в ночных условиях и дневное понижение фазовой задержки на среднеширотной радиотрассе в период восстановления геомагнитного поля.

Дополнительная ионизация нижней ионосферы под влиянием высыпаний энергичных протонов проявилась в виде повышения затухания и уменьшения фазовой задержки ОНЧ-радиосигналов в условиях высокоширотного распространения (ночью и днем). Повышение потоков протонов больших энергий 10–11 сентября также проявилось в виде уменьшения фазовой задержки ОНЧ-сигналов в дневных условиях распространения на средних широтах.

ВЫВОДЫ

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

1. На основе измерений, выполненных на GOES-15 и мировой сети нейтронных мониторов, в событии наземного возрастания КЛ (GLE72) в области энергий от 5 МэВ до 5 ГэВ установлен наблюдаемый энергетический спектр СКЛ, который описывается функцией $J(E) = J_0 E^{-\gamma} \exp(E/E_0)$. В част-

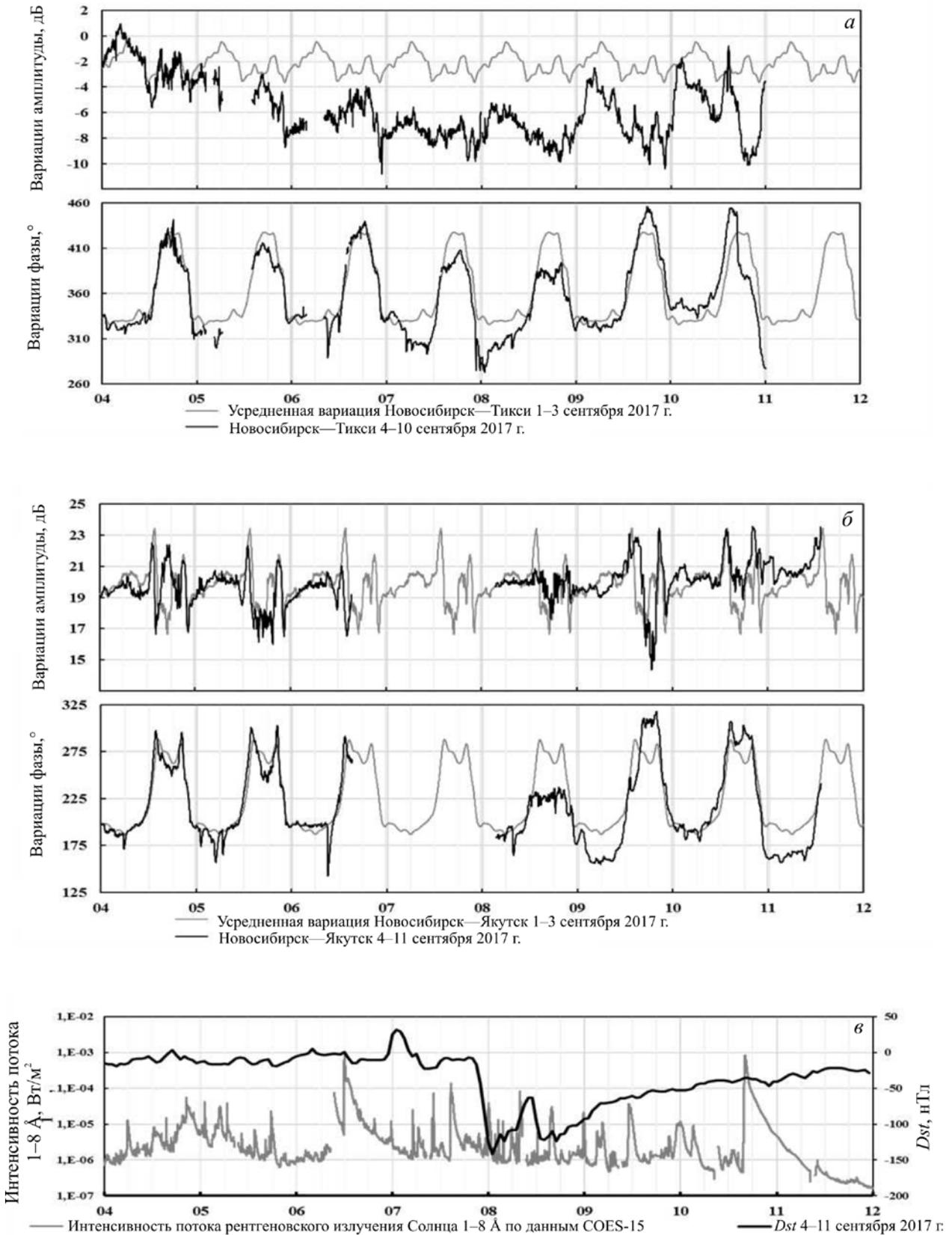


Рис. 22. Вариации амплитуды и фазы сигналов радиостанции Новосибирск (11.904 кГц), регистрация в ПГО Тикси (а) и Якутске (б), интенсивность потока рентгеновского излучения Солнца и значения Dst (в) 4–11 сентября 2017 г.

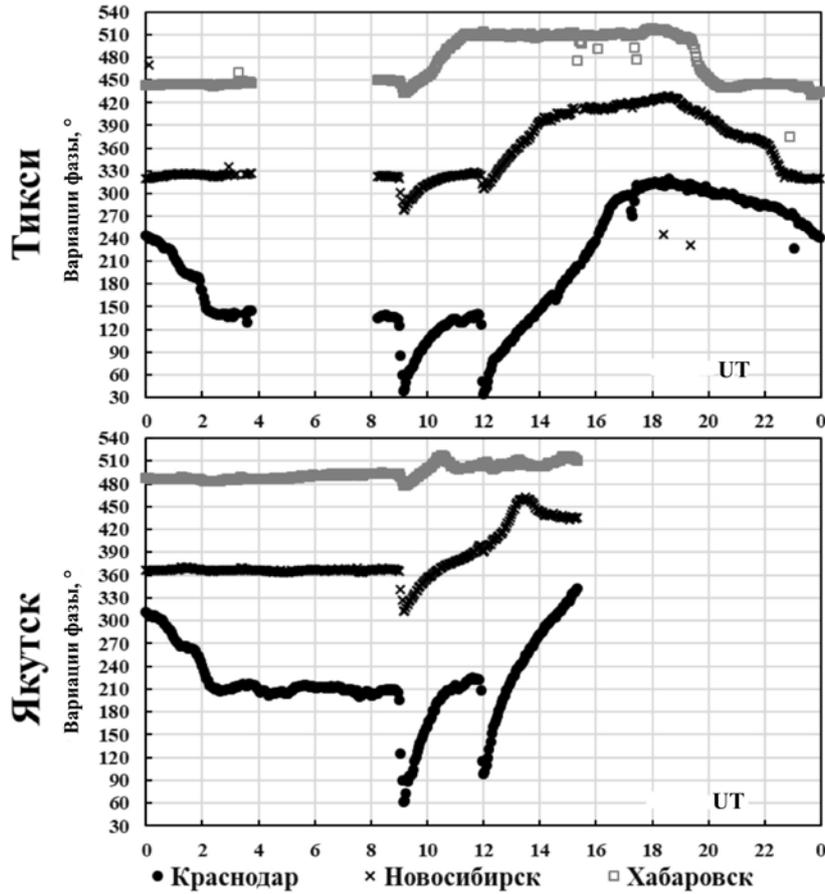


Рис. 23. Внезапные фазовые аномалии ОНЧ-сигналов (11.904 кГц), регистрируемые в Тикси и Якутске 6 сентября 2017 г.

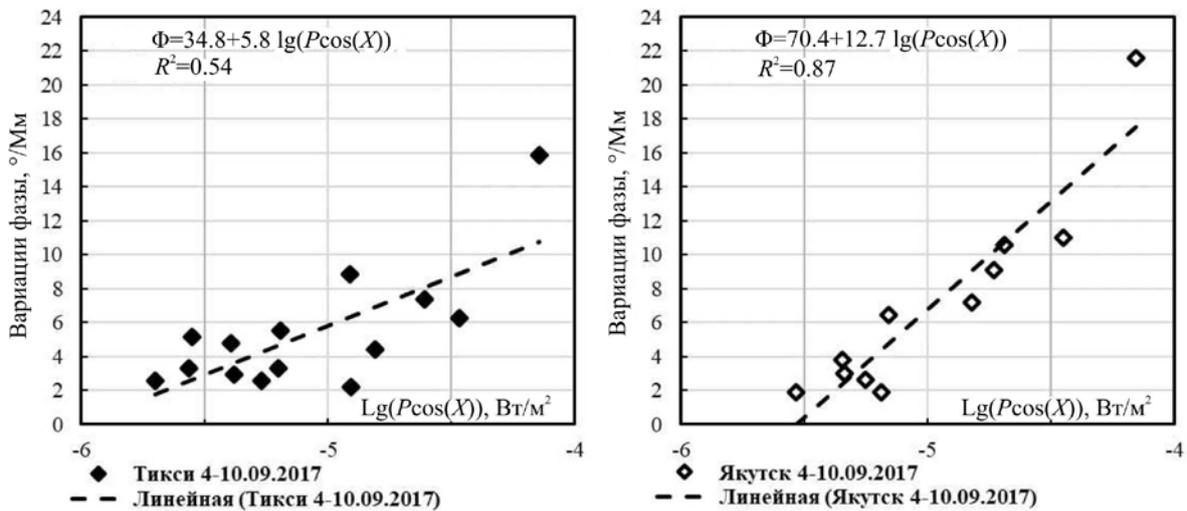


Рис. 24. Внезапные фазовые аномалии сигнала «Новосибирск» (11.904 кГц) при регистрации в Тикси и Якутске как функция потока рентгеновского излучения Солнца

ности, в 18:00 UT 10 сентября 2017 г. он удовлетворительно описывается аппроксимирующей функцией $J=3027E^{-1.99} \exp(-E/729 \text{ МэВ})$ (см. рис. 8), что вполне согласуется с общепринятым наблюдаемым в широкой области энергий спектром СКЛ.

2. На основе 1-часовых данных измерений мировой сети нейтронных мониторов с помощью метода глобальной съемки в 22:00 UT 6 сентября 2017 г. был дан прогноз начала геомагнитной бури с $Dst < -50$ нТл.

Заблаговременность прогноза составила время около суток и в конце 7 сентября 2017 г. мировой сетью магнитных станций была зарегистрирована буря с $Dst = -124$ нТл (см. рис. 5).

Детальный анализ ежесуточных спектров флуктуаций полного вектора геомагнитного поля на обсерватории Якутск показывает, что их наиболее выраженные динамические изменения определяются главным образом состоянием межпланетной

Таблица 2

Солнечные рентгеновские вспышки 4–10.09.2017
и внезапные фазовые аномалии сигналов радиостанций на частоте 11.904 кГц

Дата	Время макс. потока рентгена вспышки	Класс вспышки	Хабаровск ВФА, градус/Мм		Новосибирск ВФА, градус/Мм		Краснодар ВФА, градус/Мм	
			Якутск	Тикси	Якутск	Тикси	Якутск	Тикси
2017.09.04	05:49	M1.2	9.29	5.35	6.44	3.32	4.86	4.70
2017.09.04	20:33	M5.5	ночь	ночь	ночь	ночь	ночь	ночь
2017.09.04	22:14	M2.1	3.57	3.7	ночь	0	ночь	ночь
2017.09.05	00:35	C9.8	4.29	2.06	1.89	0	ночь	ночь
2017.09.05	01:08	M4.2	6.43	8.23	7.20	2.21	ночь	ночь
2017.09.05	03:51	M1.0	5	нет данных	2.65	нет данных	0	нет данных
2017.09.05	04:53	M3.2	8.57	7.0	9.09	нет данных	7.12	0
2017.09.05	06:40	M3.8	10	нет данных	10.61	нет данных	10.42	нет данных
2017.09.06	07:34	C2.7	1.43	нет данных	0	нет данных	0	нет данных
2017.09.06	09:10	X2.2	11.43	7.0	21.59	15.87	26.04	17.86
2017.09.06	12:02	X9.3	ночь	ночь	3.79	7.38	22.22	19.74
2017.09.06	23:39	M1.2	нет данных	4.94	нет данных	0	нет данных	ночь
2017.09.07	05:02	M2.4	нет данных	10.7	нет данных	8.86	нет данных	7.71
2017.09.07	06:28	C8.2	нет данных	7.0	нет данных	4.80	нет данных	0
2017.09.07	09:54	M1.4	нет данных	0	нет данных	0	нет данных	5.45
2017.09.07	10:15	M7.3	нет данных	ночь	нет данных	4.43	нет данных	9.96
2017.09.07	14:36	X1.3	нет данных	ночь	нет данных	ночь	нет данных	0
2017.09.07	23:00	C2.7	нет данных	0	нет данных	0	нет данных	ночь
2017.09.07	23:59	M3.9	нет данных	7.41	нет данных	5.54	нет данных	6.02
2017.09.08	02:24	M1.3	нет данных	4.53	нет данных	0	нет данных	0
2017.09.08	03:43	M1.2	8.57	4.12	1.89	0	3.65	0
2017.09.08	05:48	C8.3	9.30	3.29	3.03	2.95	3.99	0
2017.09.08	07:49	M8.1	12.14	7.0	10.98	6.27	10.07	0
2017.09.08	12:13	C5.9	ночь	ночь	ночь	0	6.25	0
2017.09.08	23:45	M2.1	12.86	7.0	0	5.17	ночь	ночь
2017.09.09	03:09	C6.3	5.71	4.53	0	3.32	0	0
2017.09.09	04:01	C4.2	0	0	0	2.58	0	0
2017.09.09	04:28	M1.1	7.14	5.35	0	2.58	0	0
2017.09.09	11:04	M3.7	ночь	ночь	0	0	6.42	7.14
2017.09.09	23:53	M1.1	2.86	6.17	0	0	ночь	ночь
2017.09.10	03:09	C9.0	10	7.82	3.79	0	0	0
2017.09.10	16:06	X8.2	ночь	ночь	ночь	ночь	ночь	ночь

Таблица 3

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

Радиотрасса	Объем выборки	Коэффициент А	Коэффициент В	Коэффициент детерминации R ²	СКО остаточных невязок, градус/Мм
Хабаровск—Якутск, 1.34 Мм	17	38.1 ± 9.8	5.9 ± 1.9	0.36	2.70
Хабаровск—Тикси, 2.43 Мм	20	29.5 ± 5.9	4.6 ± 1.1	0.48	1.67
Новосибирск—Якутск, 2.64 Мм	11	70.4 ± 8.2	12.7 ± 1.6	0.87	2.24
Новосибирск—Тикси, 2.71 Мм	14	34.8 ± 7.9	5.8 ± 1.6	0.54	2.55
Краснодар—Якутск, 5.76 Мм	10	56.7 ± 10.3	9.6 ± 2.1	0.72	4.34
Краснодар—Тикси, 5.32 Мм	7	53.3 ± 3.3	9.3 ± 0.7	0.97	1.1

среды (космической погоды) на орбите Земли. Для установления природы спектров флуктуаций геомагнитного поля требуются их дальнейшие систематические исследования с привлечением данных прямых измерений параметров среды на космических аппаратах и геостационарных спутниках.

Установлено, что 7 сентября 2017 г. на широтах $\Phi \approx 62\text{--}64^\circ \text{N}$ между Якутском и Тикси наблюдалась интенсивная эквивалентная 2-вихревая токовая система с авроральными восточной электроструей в позднем вечернем секторе (16:00–22:00 MLT) и западной электроструей в позднем утреннем секторе (05:00–08:00 MLT); 8 сентября 2017 г. наблюдались эффекты токов западного направления в дополуночном секторе (08:00–10:45 MLT) (продолжение западной электроструи предыдущего дня) и полуночном и раннем утреннем секторе (20:00–06:00 MLT). Вполне вероятно, что электроструя, зарегистрированная во втором секторе, является усиленной и перемещенной в сторону полуночных часов, а также в южном направлении западной электроструей предыдущего дня. Эта электроструя располагалась южнее Жиганска, но севернее Якутска примерно на $\Phi \approx 59^\circ \text{N}$.

Показано, что во время магнитной бури 8 сентября 2017 г. с 12 до 20 UT в широком диапазоне периодов наблюдались иррегулярные пульсации — от P13 до P11. При этом они сопровождалась вариациями величин естественных потенциалов электро-теллурического и геомагнитного полей с коэффициентом корреляции между ними $\rho(E, H) = 0.5 \div 0.9$ на уровне значимости $\alpha < 0.005$.

На основе регистрации сигналов радиостанций ОНЧ-диапазона показано, что эффекты магнитной бури проявились в виде повышения затухания и уменьшения фазовой задержки ОНЧ-радиосигналов в ночных условиях. При этом в период восстановления геомагнитного поля зарегистрировано дневное понижение фазовой задержки на среднеширотной радиотрассе. Дополнительная ионизация нижней ионосферы под влиянием высыпаний энергичных протонов проявилась в виде повышения затухания и уменьшения фазовой задержки ОНЧ-радиосигналов в условиях высокоширотного распространения

(ночью и днем). Повышение потоков протонов больших энергий 10–11 сентября 2017 г. проявилось в виде уменьшения фазовой задержки регистрируемых ОНЧ-радиосигналов в дневных условиях распространения на средних широтах.

Установлено, что для рассмотренных шести радиотрасс радиостанций ОНЧ-диапазона величина внезапных фазовых аномалий, вызванных рентгеновскими вспышками, удовлетворительно описывается линейной функцией логарифма произведения потока рентгеновского излучения и усредненного вдоль радиотрассы косинуса зенитного угла Солнца. Это в дальнейшем может быть использовано для оценки потока рентгеновского излучения по регистрируемым вариациям фазы радиосигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 18-42-140002-р_а, 18-45-140037-р_а, 18-45-140028-р_а, а также бюджетных тем № АААА-А17-117021450059-3, АААА-А17-117021450058-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александров М.С., Бакленева З.М., Гладштейн Н.Д. и др. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ. М.: Наука, 1972. 195 с.
- Баишев Д.Г., Моисеев А.В., Бороев Р.Н. и др. Международный проект MAGDAS: первые результаты геомагнитных наблюдений на территории Якутии // Наука и образование. 2013. № 1 (69). С. 7–10.
- Белоглазов М.И., Ременец Г.Ф. Распространение сверхдлинных радиоволн в высоких широтах. Л.: Наука, 1982. 237 с.
- Бережко Е.Г., Танеев С.Н. Ускорение солнечных космических лучей ударными волнами // Письма в АЖ. 2013. Т. 39, № 6. С. 443–455. DOI: 10.7868/S0320010813060016.
- Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Гололобов П.Ю. Мониторинг предвестников геомагнитных возмущений по данным наземных измерений космических лучей // Изв. РАН. Сер. физическая. 2017. Т. 81, № 2. С. 219–221.
- Каримов Р.Р., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Особенности вариаций характеристик ОНЧ-сигналов при прохождении лунной тени по трассе в период солнечного затмения 29 марта 2006 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 2. С. 250–254.
- Каримов Р.Р., Козлов В.И., Корсаков А.А. и др. Вариации параметров сигналов радионавигационных станций,

регистрируемых в Якутске в диапазоне очень низких частот // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 4. С. 57–62.

Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации // Модель космоса. Кн. 1: Физические условия в космическом пространстве / ред. Панасюк М.И., Новиков Л.С. М.: МГУ, 2007. Т. 1. С. 611–626.

Кролевец А.Н., Копылова Г.Н. Приливные составляющие в электротеллурическом поле // Физика Земли. 2003. № 5. С. 75–84.

Крымский Г.Ф., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А. Новый метод оценки абсолютного потока и энергетического спектра солнечных космических лучей по данным нейтронных мониторов // Письма в ЖЭТФ. 2008. Т. 88. С. 483–485.

Крымский Г.Ф., Григорьев В.Г., Стародубцев С.А., Танев С.Н. Наземное возрастание солнечных космических лучей 28 октября 2003 г.: механизм генерации частиц на Солнце // Письма в ЖЭТФ. 2015. Т. 102. С. 372–379.

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

Моисеев А.В., Макаров Г.А., Неустроев Н.И. Геомагнитные исследования на северо-востоке России // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2011. NZ5004. DOI: [10.2205/2011NZ000106](https://doi.org/10.2205/2011NZ000106).

Ныммик Р.А. Перегибы (колена) в крупномасштабных спектрах протонов и тяжелых ионов СКЛ: их представление, параметры и закономерности // Изв. РАН. Сер. физическая. 2011. Т. 75, № 6. С. 810–812.

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 аэрономия. 1998. Т. 38, № 3. С. 102–110.

Стародубцев С.А., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю. Якутский спектрограф космических лучей им. А.И. Кузьмина // Сборник трудов Всероссийской конференции «Гелиогеофизические исследования в Арктике». М., 2016. С. 125–128.

Стародубцев С.А., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю. Спектрограф космических лучей имени А.И. Кузьмина: новые сцинтилляционные мюонные телескопы // Изв. РАН. Сер. физическая. 2017. Т. 81, № 4. С. 577–580.

Blackman R.B. The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering. New York: Dover, 1958. 120 p.

Cheng D.Y. Anomalous short-period pulsations in GOES magnetometer data before solar proton events // Solar Phys. 1991. V. 131. P. 395–406.

Ellison D.C., Ramaty R. Shock acceleration of electrons and ions in solar flares // Astrophys. J. 1985. V. 298. P. 400–408.

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A. Global survey method in real time and space weather forecasting // Bull. RAS: Phys. 2015. V. 79. P. 649–653. DOI: [10.3103/S1062873815050226](https://doi.org/10.3103/S1062873815050226).

Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Potapova V.D. Definition of parameters of daily anisotropy of cosmic rays according to the world network of neutron monitors // J. Phys.: Conf. Ser. 2013. V. 409, iss. 1, article id. 012172. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012172](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012172).

Hessler V.P., Wescott E.M. Correlation between earth current and geomagnetic disturbance // Nature. 1959. V. 184. P. 627.

Kobrin M.M., Malygin V.I., Snegirev S.D. Long-period pulsations of the Earth's magnetic field with periods more than 20 minutes before proton flares on the Sun // Planet. Space Sci. 1985. V. 33. P. 1251–1257.

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. 70:29. DOI: [10.1186/s40623-018-0794-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0794-8).

Lovell J.L., Duldig M.L., Humble J.E. An extended analysis of the September 1989 cosmic ray ground level enhancement // J. Geophys. Res.: Space Phys. 1998. V. 103. P. 23733–23742.

Plotnikov I.Ya., Shadrina L.P., Starodubtsev S.A., Krymsky G.F. Coronal mass ejection, geomagnetic storms and ground-based cosmic ray intensity decreases // Proc. 10th Int. Conf. on Problems of Geocosmos. St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2014. P. 351–354.

Rodger C.J., Clilverd M.A., Kavanagh A.J., et al. Contrasting the responses of three different ground-based instruments to energetic electron precipitation // Radio Sci. 2012. V. 47, N 2. RS20211-13. DOI: [10.1029/2011RS004971](https://doi.org/10.1029/2011RS004971).

Shadrina L.P., Starodubtsev S.A. Manifestation of interplanetary shock in geomagnetic storms and substorms // Physics of Auroral Phenomena. 2016a. V. 39. P. 23–26.

Shadrina L.P., Starodubtsev S.A. Effect of IMF turbulence in the vicinity of interplanetary shocks on geomagnetic storms and substorms generation // 11th International Conference “Problems of Geocosmos”: Book of Abstracts. St. Petersburg, Petrodvorets, October 2016b. P. 103.

Shadrina L.P., Barkova E.S., Plotnikov I.Ya., Starodubtsev S.A. Large-scale solar wind disturbances as a reason of intense geomagnetic storms // Proc. 9th Int. Conf. “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2012. P. 381–386.

Shadrina L.P., Krymsky G.F., Plotnikov I.Ya., Starodubtsev S.A. Interplanetary shock geoeffectivity during the growth phase of solar activity // Proc. 10th Int. Conf. “Problems of Geocosmos”, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2014. P. 388–391.

Silber I., Price C. On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere — lower thermosphere // Surveys in Geophysics. 2017. V. 38. P. 407–441.

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan/README> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://stjarnhi-mlen.se/comp/tutorial.html> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/2017/09/goes15/csv/g15_xrs_1m_20170901_20170930.csv (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.spaceweather.com> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/2017/09/goes15/csv (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.solarham.net/top10.txt> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <https://www.spaceweatherlive.com> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.solarham.net> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.ysn.ru/ipm> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.ysn.ru/smt> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.nmdb.eu> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.intermagnet.org> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://magdas2.serc.kyushu-u.ac.jp/station/index.html> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: <http://www.stce.be/newsletter/pdf/2017/STCEnews20170915.pdf> (дата обращения 9 октября 2018 г.).

URL: http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html (дата обращения 9 октября 2018 г.).

REFERENCES

- Aleksandrov M.S., Bakleneva Z.M., Gladshtein N.D., Ozerov V.P., Potapov A.V., Remizov L.T. *Fluktuatsii elektromagnitnogo polya Zemli v diapazone SNCh* [Fluctuations of the Earth's electromagnetic field in the SLF range]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 195 p. (In Russian).
- Baishev D.G., Moiseev A.V., Boroev R.N., Makarov G.A., Poddel'skiy I.N., Poddel'skiy A.I., Shevtsov B.M., Yumoto K. International MAGDAS Project: first results of geomagnetic observations in Yakutia. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2013, no. 1 (69), pp. 7–10. (In Russian).
- Beloglazov M.I., Remenets G.F. *Rasprostranenie sverkhdlimnykh radiovoln v vysokikh shirotakh* [Superlong radio waves propagation in high latitudes]. Leningrad, Nauka Publ., 1982, 237 p. (In Russian).
- Berezhko E.G., Taneev S.N. Shock acceleration of solar cosmic rays. *Astron. Lett.* 2013, vol. 39, no. 6, pp. 393–403. DOI: [10.1134/S1063773713060017](https://doi.org/10.1134/S1063773713060017).
- Blackman R.B. *The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communications Engineering*. New York, Dover Publ., 1958, 120 p.
- Cheng D.Y. Anomalous short-period pulsations in GOES magnetometer data before solar proton events. *Solar Phys.* 1991, vol. 131, pp. 395–406.
- Ellison D.C., Ramaty R. Shock acceleration of electrons and ions in solar flares. *Astrophys. J.* 1985, vol. 298, pp. 400–408.
- Hessler V.P., Wescott E.M. Correlation between earth current and geomagnetic disturbance. *Nature*. 1959, vol. 184, pp. 627.
- Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A. Global survey method in real time and space weather forecasting. *Bull. RAS: Phys.* 2015, vol. 79, pp. 649–653. DOI: [10.3103/S1062873815050226](https://doi.org/10.3103/S1062873815050226).
- Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Potapova V.D. Definition of parameters of daily anisotropy of cosmic rays according to the world network of neutron monitors. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2013, vol. 409, iss. 1, article id. 012172. DOI: [10.1088/1742-6596/409/1/012172](https://doi.org/10.1088/1742-6596/409/1/012172).
- Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Gololobov P.Y. Monitoring of geomagnetic disturbance predictors from cosmic ray ground measurements. *Bull. RAS: Phys.* 2017, vol. 81, no. 2, pp. 200–202.
- Karimov R.R., Kozlov V.I., Mullayarov V.A. Specific features of variations in the characteristics of VLF signals when the lunar shadow propagated along the path during the solar eclipse of March 29, 2006. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2008, vol. 48, no. 2, pp. 240–244.
- Karimov R.R., Kozlov V.I., Korsakov A.A., Mullayarov V.A., Mel'chinov V.P. Variations of very low frequency signal parameters of radio navigation stations registered in Yakutsk. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. 2012, vol. 9, no. 4, pp. 57–62. (In Russian).
- Kleymenova N.G. Geomagnetic pulsations. *Model' kosmosa. Kn. 1: Fizicheskie usloviya v kosmicheskom prostanstve* [Space Model. Vol. 1: Physical Conditions in Space]. Moscow, MGU Publ., 2007, vol. 1, pp. 611–626. (In Russian).
- Kobrin M.M., Malygin V.I., Snegirev S.D. Long-period pulsations of the Earth's magnetic field with periods more than 20 minutes before proton flares on the Sun. *Planet. Space Sci.* 1985, vol. 33, pp. 1251–1257.
- Krolevets A.N., Kopylova G.N. Tidal components in the electrotelluric field. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth.* 2003, vol. 39, no. 5, pp. 418–427.
- Krymsky G.F., Grigor'ev V.G., Starodubtsev S.A. New method for estimating the absolute flux and energy spectrum of solar cosmic rays based on neutron-monitor data. *JETP Lett.* 2008, vol. 99, no. 7, pp. 411–413.
- Krymsky G.F., Grigoryev V.G., Starodubtsev S.A., Taneev S.N. Ground-level enhancement of solar cosmic ray on October 28, 2003: a mechanism of the generation of particles in the Sun. *JETP Lett.* 2015, vol. 102, pp. 335–342.
- 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, 70:29. DOI: [10.1186/s40623-018-0794-8](https://doi.org/10.1186/s40623-018-0794-8).
- Lovell J.L., Duldig M.L., Humble J.E. An extended analysis of the September 1989 cosmic ray ground level enhancement. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1998, vol. 103, pp. 23733–23742.
- Mitra A.P. *Vozdeistvie solnechnykh vspyshek na ionosferu Zemli* [Effects of solar flares on Earth's ionosphere]. Moscow, Mir Publ., 1977. 370 p. English edition: Mitra A.P. *Ionospheric Effects of Solar Flares*. Dordrecht, Holland, D. Reidel Publ. Co., 1974. 307 p.
- Moiseev A.V., Makarov G.A., Neustroev N.I. Geomagnetic investigations in the north-eastern Russia. *Vestnik Otdeleniya nauk o Zemle RAN* [Bull. Department of Earth Sciences RAS]. 2011, NZ5004. DOI: [10.2205/2011NZ000106](https://doi.org/10.2205/2011NZ000106). (In Russian).
- Nymmik R.A. Inflections (knees) in wide-range spectra of solar energetic protons and heavy ions: their form, parameters, and regularities. *Bull. RAS: Phys.* 2011, vol. 75, no. 6, pp. 761–763. DOI: [10.3103/S1062873811060335](https://doi.org/10.3103/S1062873811060335).
- Orlov A.B., Pronin A.E., Uvarov A.N. Latitudinal dependence of the effective electron-loss coefficient in the daytime lower ionosphere as deduced from VLF phase variations and riometric absorption data during SIDs. *Geomagnetism and Aeronomy.* 1998, vol. 38, no. 3, pp. 341–346.
- Plotnikov I.Ya., Shadrina L.P., Starodubtsev S.A., Krymsky G.F. Coronal mass ejection, geomagnetic storms and ground-based cosmic ray intensity decreases. *Proc. 10th Int. Conf. "Problems of Geocosmos"*. St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2014, pp. 351–354.
- Rodger C.J., Clilverd M.A., Kavanagh A.J., Watt C.E.J., Verronen P.T., Raita T. Contrasting the responses of three different ground-based instruments to energetic electron precipitation. *Radio Sci.* 2012, vol. 47, no. 2, RS20211-13. DOI: [10.1029/2011RS004971](https://doi.org/10.1029/2011RS004971).
- Shadrina L.P., Starodubtsev S.A. Manifestation of interplanetary shock in geomagnetic storms and substorms. *Physics of Auroral Phenomena.* 2016a, vol. 39, pp. 23–26.
- Shadrina L.P., Starodubtsev S.A. Effect of IMF turbulence in the vicinity of interplanetary shocks on geomagnetic storms and substorms generation. *Proc. 11th Int. Conf. "Problems of Geocosmos"*, St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October, 2016, 2016b, pp. 103.
- Shadrina L.P., Barkova E.S., Plotnikov I.Ya., Starodubtsev S.A. Large-scale solar wind disturbances as a reason of intense geomagnetic storms. *Proc. 9th Int. Conf. "Problems of Geocosmos"*. St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2012, pp. 381–386.
- Shadrina L.P., Krymsky G.F., Plotnikov I.Ya., Starodubtsev S.A. Interplanetary shock geoeffectivity during the growth phase of solar activity. *Proc. 10th Int. Conf. "Problems of Geocosmos"*. St. Petersburg, Petrodvorets, Russia, October 2014, pp. 388–391.
- Silber I., Price C. On the use of VLF narrowband measurements to study the lower ionosphere and the mesosphere — lower thermosphere. *Surveys in Geophysics*, 2017, vol. 38, pp. 407–441.
- Starodubtsev S.A., Grigor'ev V.G., Gololobov P.Yu. Kuzmin A.I. Yakutsk Cosmic Ray Spectrograph. *Sbornik trudov Vserossiiskoi konferentsii "Geliogeofizicheskie issledovaniya v Arktike"* [Proc. National Conference "Heliogeophysical Research in Arctic"]. Moscow, 2016, pp. 125–128. (In Russian).
- Starodubtsev S.A., Grigoryev V.G., Gololobov P.Y. The A.I. Kuz'min cosmic ray spectrograph: New scintillation muon telescopes. *Bull. RAS: Phys.* 2017, vol. 81, iss. 4, pp. 538–541.

С.А. Стародубцев, Д.Г. Баишев, В.Г. Григорьев, Р.Р. Каримов, В.И. Козлов, А.А. Корсаков, Г.А. Макаров, А.В. Моисеев

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan/README> (accessed October 9, 2018).

URL: <http://stjarnhi-mlen.se/comp/tutorial.html> (accessed October 9, 2018).

URL: https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/2017/09/goes15/csv/g15_xrs_1m_20170901_20170930.csv (accessed October 9, 2018).

URL: <http://www.spaceweather.com> (accessed October 9, 2018).

URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Geomagnetic_storm (accessed October 9, 2018).

URL: https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/new_avg/2017/09/goes15/csv (accessed October 9, 2018).

URL: <http://www.solarham.net/top10.txt> (accessed October 9, 2018).

URL: <https://www.spaceweatherlive.com> (accessed October 9, 2018).

URL: <http://www.solarham.net> (accessed October 9, 2018).

URL: http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/index.html (accessed October 9, 2018).

URL: <http://www.ysn.ru/ipm> (accessed October 9, 2018).

URL: <http://www.ysn.ru/smt> (accessed October 9, 2018).

S.A. Starodubtsev, D.G. Baishev, V.G. Grigoryev, R.R. Karimov, V.I. Kozlov, A.A. Korsakov, G.A. Makarov, A.V. Moiseev

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/pchan> (accessed October 9, 2018).

URL: <http://www.nmdb.eu> (accessed October 9, 2018).

URL: <http://www.intermagnet.org> (accessed October 9, 2018).

URL: <http://magdas2.serc.kyushu-u.ac.jp/station/index.html> (accessed October 9, 2018).

URL: <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html> (accessed October 9, 2018).

URL: http://www.stce.be/newsletter/pdf/2017/STCEnews_20170915.pdf (accessed October 9, 2018).

URL: http://www.ysn.ru/~starodub/SpaceWeather/global_survey_real_time.html (accessed October 9, 2018).

Как цитировать эту статью

Стародубцев С.А., Баишев Д.Г., Григорьев В.Г., Каримов Р.Р., Козлов В.И., Корсаков А.А., Макаров Г.А., Моисеев А.В. 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.