

УДК 550.837.211

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-4-124-132

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ КОМПОНЕНТ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ НА ПРИМЕРЕ РАБОТ В РАЙОНЕ ИЛЬМЕНСКОЙ КОРОВОЙ АНОМАЛИИ

Виктор Александрович Куликов¹, Дмитрий Викторович Епишкин²,
Анна Павловна Ионичева³, Наталья Максимовна Шагарова^{4✉},
Михаил Игоревич Ширяев⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vic@nw-geophysics.ru

² Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; dmitri_epishkin@mail.ru

³ Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; yaroslavtseva.anna@gmail.com

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nataliashagarova@yandex.ru ✉

⁵ Центр геоэлектromагнитных исследований ИФЗ РАН, Троицк, Россия; shiriaev_misha@mail.ru

Аннотация. В статье приводятся результаты сопоставления спектральной плотности компонент магнитотеллурического поля в широком частотном диапазоне и солнечной активности. В расчетах использовались данные магнитотеллурического зондирования, полученные группой сотрудников кафедры геофизики Геологического факультета Московского государственного университета и Центра геоэлектromагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук в центральной части Восточно-Европейской платформы в период с 2020 по 2024 гг. Измерения проводились как в летний, так и в зимний периоды с однотипной аппаратурой. Обработка всех магнитотеллурических данных была выполнена в программе EPI-KIT. Полученные корреляционные зависимости важны для учета прогноза солнечной погоды при планировании полевых работ.

Ключевые слова: магнитотеллурическое поле, солнечная активность, магнитотеллурические зондирования

Для цитирования: Куликов В.А., Епишкин Д.В., Ионичева А.П., Шагарова Н.М., Ширяев М.И. Корреляция между спектральной плотностью компонент магнитотеллурического поля и солнечной активностью на примере работ в районе Ильменской коровой аномалии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 4. С. 124–132.

CORRELATION BETWEEN THE SPECTRAL DENSITY OF THE MT FIELD COMPONENTS AND SOLAR ACTIVITY ON THE EXAMPLE OF WORKS NEAR THE ILMEN CRUSTAL ANOMALY

Viktor A. Kulikov¹, Dmitriy V. Epishkin², Anna P. Ionicheva³,
Natalya M. Shagarova^{4✉}, Mihail I. Shiryayev⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vic@nw-geophysics.ru

² Geoelectromagnetic Research Center Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Troitsk, Russia; dmitri_epishkin@mail.ru

³ Geoelectromagnetic Research Center Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Troitsk, Russia; yaroslavtseva.anna@gmail.com

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nataliashagarova@yandex.ru ✉

⁵ Geoelectromagnetic Research Center Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Troitsk, Russia; shiriaev_misha@mail.ru

Abstract. The article presents the results of comparing the spectral density of the MT field components in a wide frequency range and solar activity. The calculations used the MTS data obtained by a group of employees of the Department of Geophysics of the Faculty of Geology of Moscow State University and GEMRC IPE RAS in the central part of the East European Platform in the period from 2020 to 2024. Measurements were carried out both in summer and in winter with the same type of equipment. The processing of all MT data was performed in the EPI-KIT program. The obtained correlations are important for taking into account the forecast of sun weather when planning field work.

Keywords: MT field, solar activity, magnetotelluric sounding

For citation: Kulikov V.A., Epishkin D.V., Ionicheva A.P., Shagarova N.M., Shiryayev M.I. Correlation between the spectral density of the MT field components and solar activity on the example of works near the Ilmen crustal anomaly. *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 4: 124–132. (In Russ.).

Введение. Магнитотеллурические (МТ) методы основаны на изучении естественного переменного электромагнитного (ЭМ) поля Земли различной частоты. МТ поле порождается электрическими токами в ионосфере и магнитосфере Земли, грозowymi разрядами и другими источниками, находящимися на достаточном удалении от точки наблюдения. Природа низкочастотного (ниже 1 Гц) МТ поля основана на взаимодействии солнечного ветра (исходящего от Солнца и изменяющегося во времени потока заряженных частиц) с магнитосферой и ионосферой Земли. Будучи в целом электрически нейтральным, при достижении магнитосферы Земли поток частиц солнечного ветра разделяется на потоки по-

ложительно и отрицательно заряженных частиц, закручивающиеся вдоль силовых линий магнитного поля и затекающие в ионосферу в полярных областях [Электроразведка..., 2018].

Авторами была поставлена задача проверить связь между спектральной плотностью компонент МТ поля и солнечной активностью на большой выборке реальных полевых измерений. Все данные, использованные в расчетах, были получены на относительно небольшом участке в центре Восточно-Европейской платформы (рис. 1) в течение первой фазы 25-го 11-летнего цикла солнечной активности (закон Швабе-Вольфа), когда происходил ее быстрый и заметный рост (с 2020 по 2024 гг.).

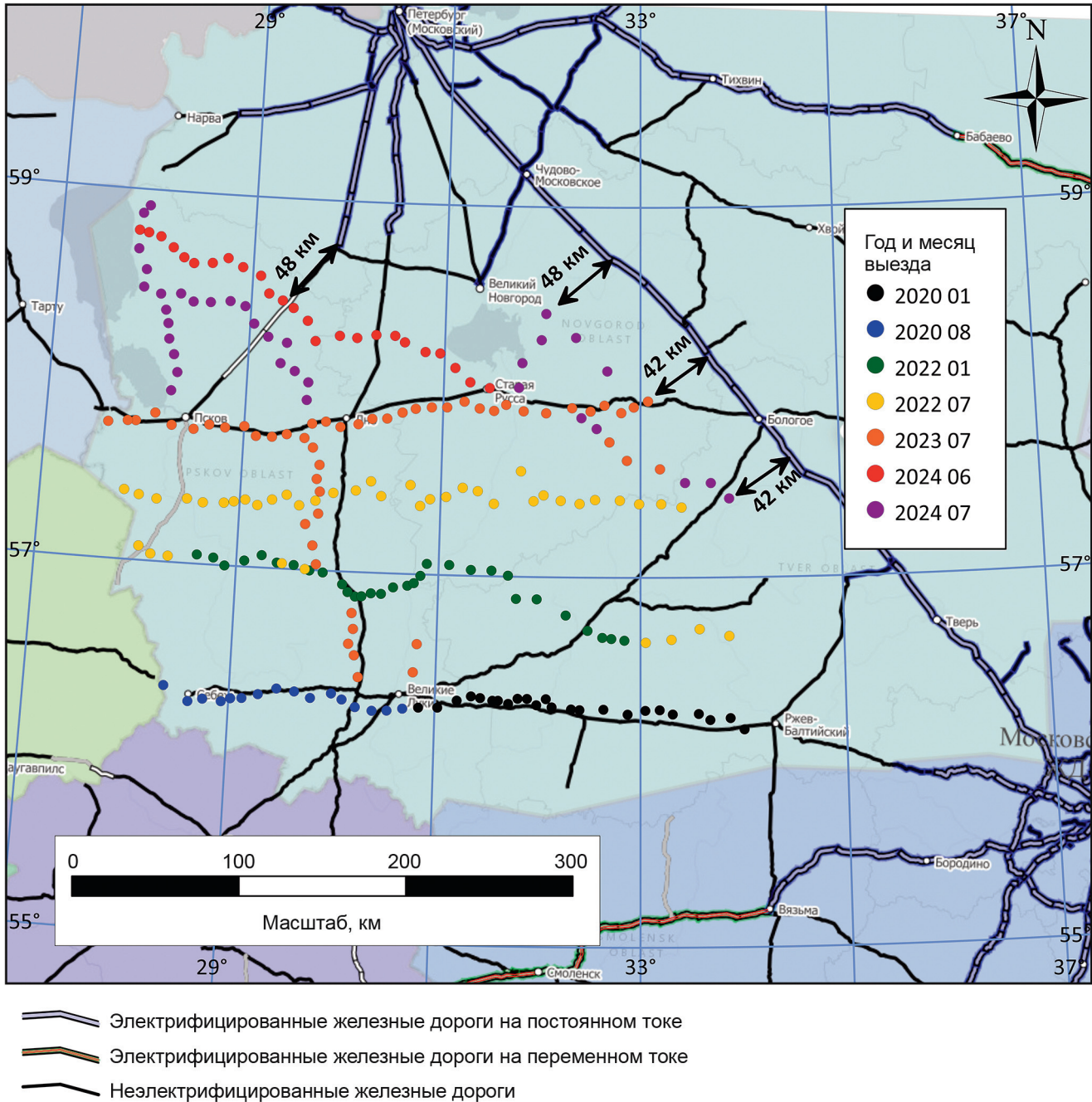


Рис. 1. Положение точек измерений методом МТЗ на фоне карты железных дорог

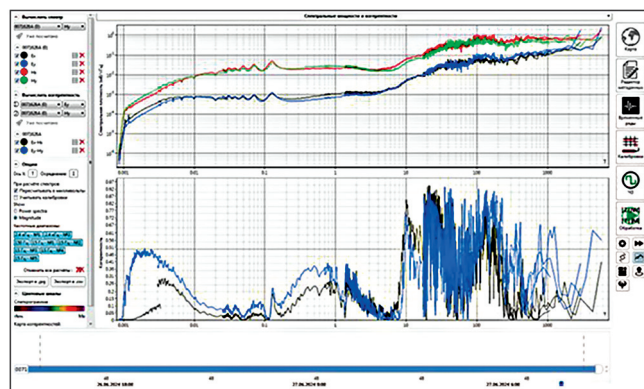


Рис. 2. Рабочее окно программы EPI-KIT. Модуль «Анализ данных». Вверху — спектральные мощности четырех компонент МТ поля, внизу — оценка когерентности между ортогональными компонентами E_x , H_x и E_y , H_y

Измерения проводились с однотипной МТ аппаратурой, а обработка данных выполнялась с помощью одного комплекса программ EPI-KIT и MT-Corrector (ООО «Северо-Запад»). Важной особенностью данных измерений является удаленность (~40 км) от точек зондирования электрифицированных железных дорог, которые на более близких расстояниях существенно влияют на ЭМ поле и могут приводить к завышению спектральной плотности [Епишкин, 2018]. Отметим также, что для достоверности результата измерения проводились как в летний, так и в зимний период.

Полученные корреляционные зависимости важны для учета прогноза солнечной погоды при планировании полевых работ.

Фактический материал. Измерения методом МТЗ в западной части Восточно-Европейской платформы проводились группой сотрудников кафедры геофизики Геологического факультета МГУ и Центра геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ЦГЭМИ ИФЗ РАН) с участием студентов и аспирантов. С января 2020 г. по август 2024 г. было организовано семь экспедиций — две зимних и пять летних, результаты которых публиковались авторами ранее [Куликов и др., 2021, 2023, 2024]. Общий объем измерений составил примерно 230 ф.н. МТЗ. На карте фактического материала (рис. 1) представлено распределение точек наблюдений по отдельным экспедициям.

Параллельно с измерениями на рядовых точках проводились измерения с теми же параметрами записи и с той же аппаратурой на базовой точке, расположенной на учебно-научном полигоне Геологического факультета МГУ в д. Александровка Калужской области.

Регистрация компонент МТ поля осуществлялась с помощью электроразведочных станций МЭРИ-ПРО, разработанных в компании ООО «Северо-Запад», с использованием индукционных датчиков IMS-010 и IMS-015 производства ООО «Вега».

На рис. 1 видно, что ближайшими электрифицированными железными дорогами (ЭЖД) являются Октябрьская, Минская и дороги, соединяющие г. Санкт-Петербург с городами Луга и Новгород. Минимальное расстояние до Октябрьской ЭЖД составляет 42 км.

Программное обеспечение. Для обработки временных рядов МТ поля и получения спектров отдельных компонент использовалась программа EPI-KIT, разработанная в компании ООО «Северо-Запад» (автор Епишкин Д.В.).

Вычисление спектров (рис. 2) в данной программе происходит следующим образом: выбирается окно фиксированной длины; задается шаг его движения по временному ряду; для каждого положения убирается линейный тренд, затем выполняется преобразование Фурье с использованием одной из оконных функций (возможно — прямоугольная, Хемминга, Блэкмана-Наталла, Гаусса, плосковершинная). Использование оконных функций уменьшает эффект рассеивания спектральной энергии на соседние частоты.

Для более точной оценки импеданса используется расчет спектров в окнах разной длины. Для нахождения передаточных функций на малых периодах используются окна малой длины, для больших периодов используются, соответственно, большие окна. Самые высокие и самые низкие частоты для каждого окна отбрасываются по причине их сильной искаженности [Епишкин, 2018].

Также в работе использовалась программа QC-QA, предназначенная для оперативного контроля и оценки качества результатов обработки магнитотеллурических данных, разработанная в ООО «Северо-Запад». Критерии, которые используются для оценки качества в программе, выработаны на основе опыта, полученного сотрудниками кафедры геофизики Геологического факультета МГУ и компании ООО «Северо-Запад» за несколько десятилетий МТ наблюдений.

Параметры солнечной активности. *Солнечные вспышки.* Один из главных показателей солнечной магнитной активности — количество солнечных пятен. Солнечные пятна являются областями выхода в фотосферу сильных магнитных полей. Потемнение фотосферы в пятнах обусловлено подавлением магнитным полем конвективных движений вещества и, как следствие, снижением потока переноса тепловой энергии в этих областях. Когда пятен много, существует высокая вероятность того, что произойдет солнечная вспышка. Всплеск излучения, достигая Земли, вызывает сильные возмущения ее магнитного поля. Вспышки также порождают поток радиации во всех диапазонах электромагнитного спектра, от радиоволн до рентгеновских и гамма-лучей [Солнечная..., 2024].

Солнечный цикл связан с частотой появления пятен, их активностью (от минимума, включая полное отсутствие, до нескольких сотен при максимуме)

и сроком жизни. Один цикл охватывает примерно 11 лет (рис. 3).

В последние годы часто используют классификацию, основанную на измерениях амплитуды теплового рентгеновского всплеска в диапазоне энергий 0,5–10 кэВ (с длиной волны 0,5–8 Å). Классификация была предложена в 1970 г. Д. Бейкером [Priest, 1981]. По этой классификации солнечной вспышке присваивается балл — обозначение из латинской буквы и индекса за ней. Буквой может быть А, В, С, М или Х в зависимости от величины достигнутого всплеска пика интенсивности рентгеновского излучения. Интенсивность излучения для вспышек: $A < 10^{-7}$ Вт/м², $B = 10^{-7} - 10^{-6}$ Вт/м², $C = 10^{-6} - 10^{-5}$ Вт/м², $M = 10^{-5} - 10^{-4}$ Вт/м², $X = 10^{-4} - 10^{-3}$ Вт/м². Вспышка класса М1 в 10 раз мощнее С1, а Х1 в 10 раз мощнее М1 и в 100 раз мощнее С1. Индекс указывает, во сколько раз вспышка сильнее нулевого уровня [Сотникова, 2013].

Индексы геомагнитной активности. К-индекс — индекс геомагнитной активности, измеряемый в месте, где установлен магнетометр. Индекс изменяется в зависимости от отклонений возмущения более неустойчивой горизонтальной компоненты поля и вычисляется в совокупности показателей каждые три часа. Минимальное значение индекса равно нулю, что означает спокойное магнитное поле, максимальное значение равно 9, что означает, что на Земле действовала экстремальная магнитная буря. Амплитуда показателей для составления индекса зависит от геомагнитной широты наблюдения.

К-шкала является квазилогарифмической, т. е. возрастание К с 8 до 9 баллов означает гораздо большее увеличение возмущения, чем с 1 до 2 баллов.

K_p индекс — усредненное значение для каждого трех часов, строится на основе стандартизированных измерений двух горизонтальных компонент геомагнитного поля, наблюдаемых в 13 магнитных обсерваториях, расположенных в субавроральной зоне между 48 и 63 градусами северной и южной широт. Учитывается и локальное время каждой из станций измерения.

A_p индекс вычисляется по значениям K_p индекса и представляет изменение наиболее возмущенного элемента магнитного поля D или H в трехчасовом интервале времени на среднеширотных станциях. A_p индекс называют планетарной амплитудой в трехчасовом интервале.

A_p индекс изменяется в интервале от 0 до 400 и представляет значения K_p , преобразованные к линейной шкале в нанотеслах (нТл), которая показывает эквивалентное возмущение амплитуды на станции (при К = 9 имеет нижний предел в 400 нТл). A_p индекс получается осреднением восьми значений A_p за день и является эквивалентной среднесуточной планетарной амплитудой возмущения магнитного поля Земли с линейной шкалой [Описание..., 2024].

Методика анализа данных. На первом этапе была проведена оценка плотности спектров 4-х компонент

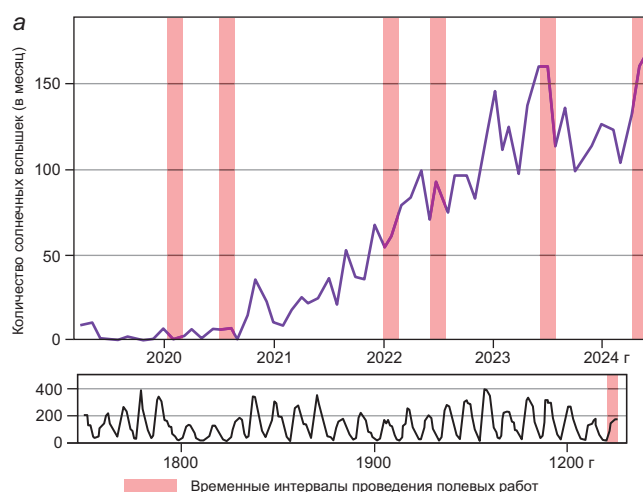


Рис. 3. Количество солнечных вспышек в месяц: а — с 2019 по 2024 гг.; б — с 1755 по 2024 гг. [История..., 2024]

МТ поля (E_x , E_y , H_x , H_y) на каждой точке с детальным шагом по частоте. Далее весь частотный диапазон измерений ($10^{-3} - 10^3$ Гц) был разбит на шесть поддиапазонов, в границах которых было проведено осреднение значений плотности спектров: ВЧ1 ($10^3 - 10^2$ Гц); ВЧ2 ($10^2 - 10^1$ Гц); СЧ1 ($10^1 - 10^0$ Гц); СЧ2 ($10^0 - 10^{-1}$ Гц); НЧ1 ($10^{-1} - 10^{-2}$ Гц); НЧ2 ($10^{-2} - 10^{-3}$ Гц).

Ежедневно регистрация проводилась на нескольких точках МТЗ, поэтому на следующем этапе было проведено осреднение результатов, полученных в течение одного дня наблюдений.

Предварительные оценки первичных данных по когерентности показали, что качество широтных и меридиональных компонент поля примерно одинаковое, поэтому на следующем этапе было выполнено осреднение по двум компонентам.

Итогом обработки стала электронная база данных, где для каждого дня измерений было получено по шесть значений плотности спектра магнитного и электрического поля (по одному значению на каждую частотную декаду). Эти значения сопоставлялись с параметрами солнечной активности.

На последнем этапе осреднялись значения по каждой экспедиции, которые затем сопоставлялись со средними показателями солнечной активности за тот же период.

Сравнение между МТ данными и параметрами солнечной активности проводилось на основе корреляционного анализа и в графическом виде.

Предназначение корреляционного анализа сводится к выявлению наличия зависимости между различными факторами. Если зависимость установлена, то определяется коэффициент корреляции. Коэффициент корреляции варьируется в диапазоне от +1 до -1. Положительный коэффициент корреляции от 0,75 до 1 показывает сильную статистическую зависимость между двумя величинами, от 0,5 до 0,75 — среднюю, от 0,25 до 0,5 — слабую.

Результаты анализа. За период измерений с января 2020 г. по июль 2024 г. солнечная активность су-

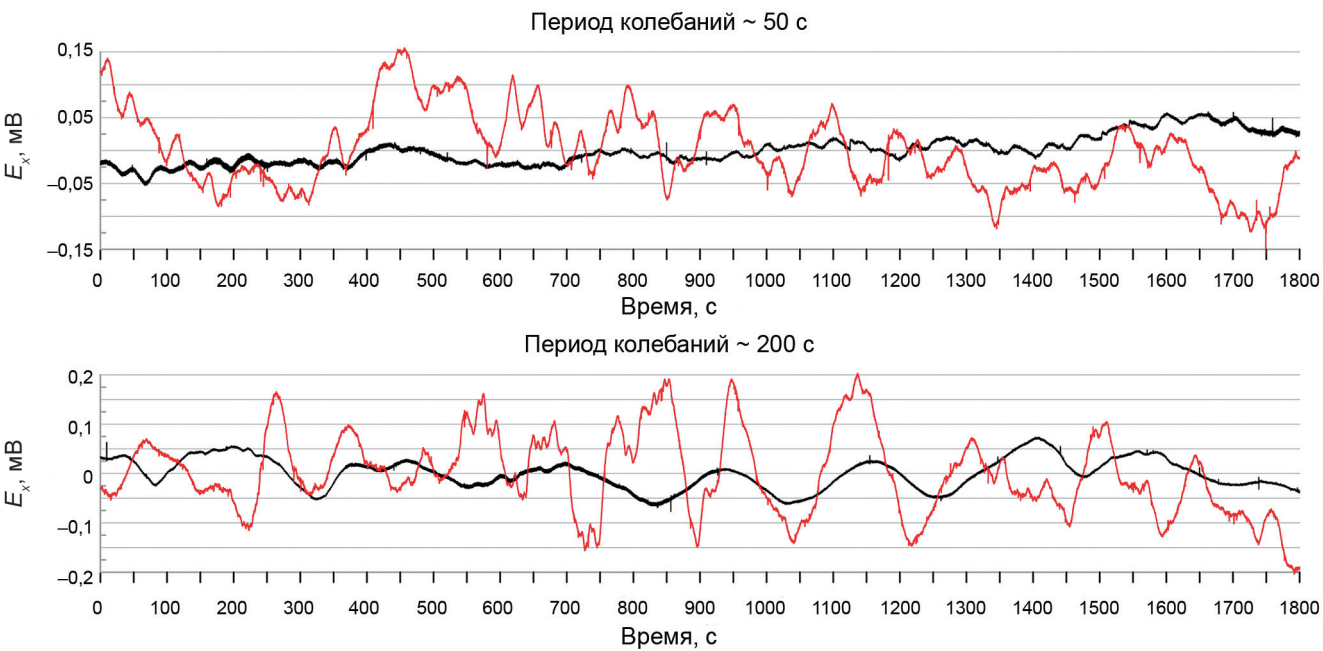


Рис. 4. Фрагменты временных рядов компоненты электрического поля в период низкой (2020 г., черный цвет) и высокой (2023 г., красный цвет) солнечной активности

Таблица 1
Средние дневные значения индексов солнечной активности и качества результатов обработки данных МТЗ по оценкам программы QC-QA

Выезды	Кол-во точек	Даты	K_p	A_p	РП	C+M+X	QC-QA
1	24	26.01.2020–01.02.2020	2,6	5,2	1,03E-08	0	3,5
2	16	11.08.2020–15.08.2020	1,4	3,8	1,69E-08	0	3,7
3	31	26.01.2022–02.02.2022	3,5	10	5,15E-07	12	3,8
4	43	08.07.2022–19.07.2022	3	9	1,04E-06	14	4,1
5	53	08.07.2023–21.07.2023	3,1	9,2	1,70E-06	28	4,3
6	25	20.06.2024–27.06.2024	2,6	9,3	2,39E-06	22	4,4
7	35	15.07.2024–23.07.2024	2,3	5,4	2,19E-06	51	4,4

Примечания: K_p , A_p — индексы геомагнитной активности; РП — интенсивность рентгеновского потока в Вт/м²; C+M+X — среднее количество солнечных вспышек в день; QC-QA — качество результатов обработки данных МТЗ по 5-бальной шкале.

щественно выросла, что выражается и в количестве солнечных вспышек разного класса, и в интенсивности рентгеновского потока, и в средних значениях геомагнитной активности (табл. 1). Если во время зимних и летних работ 2020 г. не было зафиксировано ни одной солнечной вспышки класса С, то во время второго летнего выезда 2024 г. за 9 дней экспедиции произошло 72 вспышки класса С, 29 вспышек класса М и 1 вспышка класса Х.

Средний уровень рентгеновского излучения во время измерений в 2020 г. не превышал $2 \cdot 10^{-8}$ Вт/м², и вырос за 4 года на два порядка, до $2 \cdot 10^{-6}$ Вт/м².

Таблица 2
Коэффициенты корреляции между плотностью спектров МТ полей, параметрами солнечной активности и качеством результатов обработки данных по оценкам программы QC-QA (осреднение по всем записям)

ЧД	Магнитное поле					Электрическое поле				
	K_p	A_p	РП	Вспышки	QC-QA	K_p	A_p	РП	Вспышки	QC-QA
ВЧ1	-0,1	0,0	0,3	0,3	0,3	-0,1	0,0	0,5	0,5	0,5
ВЧ2	-0,1	0,0	0,6	0,4	0,5	-0,1	0,0	0,3	0,3	0,3
СЧ1	0,0	0,1	0,6	0,4	0,6	0,0	0,1	0,4	0,4	0,4
СЧ2	0,3	0,4	0,7	0,4	0,6	0,0	0,1	0,5	0,4	0,3
НЧ1	0,5	0,5	0,2	0,0	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,5
НЧ2	0,6	0,7	0,3	0,1	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5

Примечания. ЧД — частотный диапазон; РП — интенсивность рентгеновского потока в Вт/м²; Вспышки — сумма солнечных вспышек с учетом коэффициента С (1), М (10), Х (100); QC-QA — качество результатов обработки данных МТЗ по 5-бальной шкале; 0,8 — высокая корреляционная зависимость; 0,6 — средняя корреляционная зависимость; 0,3 — слабая корреляционная зависимость; 0,1 — корреляционная зависимость отсутствует.

Средний уровень K_p -индекса изменялся во время экспедиций от 1,4 до 3,5, а A_p -индекса от 3,8 до 10. В целом, наблюдается рост геомагнитной активности с 2020 по 2024 гг., но не линейный и не значительный. При сравнении записей разных лет становится заметна существенная разница в амплитуде колебаний МТ поля на разных частотах (рис. 4).

Качество результатов обработки данных МТЗ неуклонно росло с 2020 г. от средней оценки 3,5 до средней оценки 4,4 (табл. 1, рис. 5).

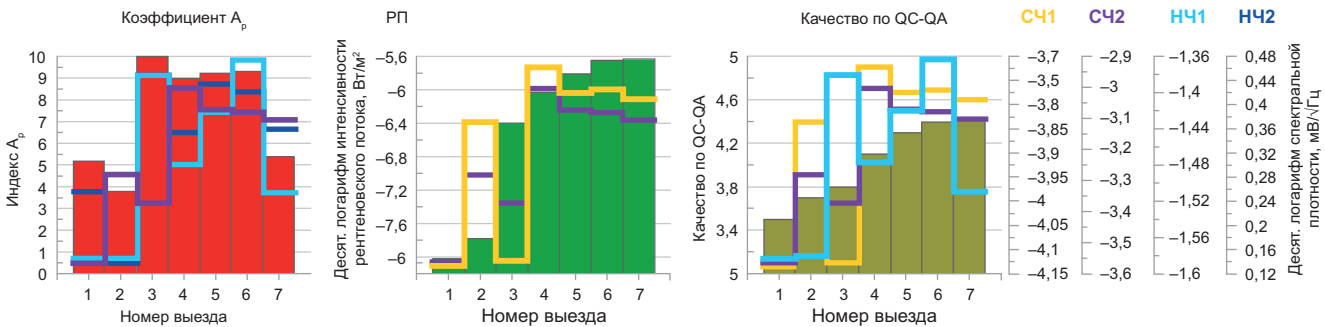


Рис. 5. Графическое сопоставление индексов солнечной активности и качества результатов обработки МТЗ с плотностью спектра магнитного поля для разных диапазонов частот (СЧ1 1–10 Гц; СЧ2 0,1–1 Гц; НЧ1 0,01–0,1 Гц; НЧ2 0,001–0,01 Гц)

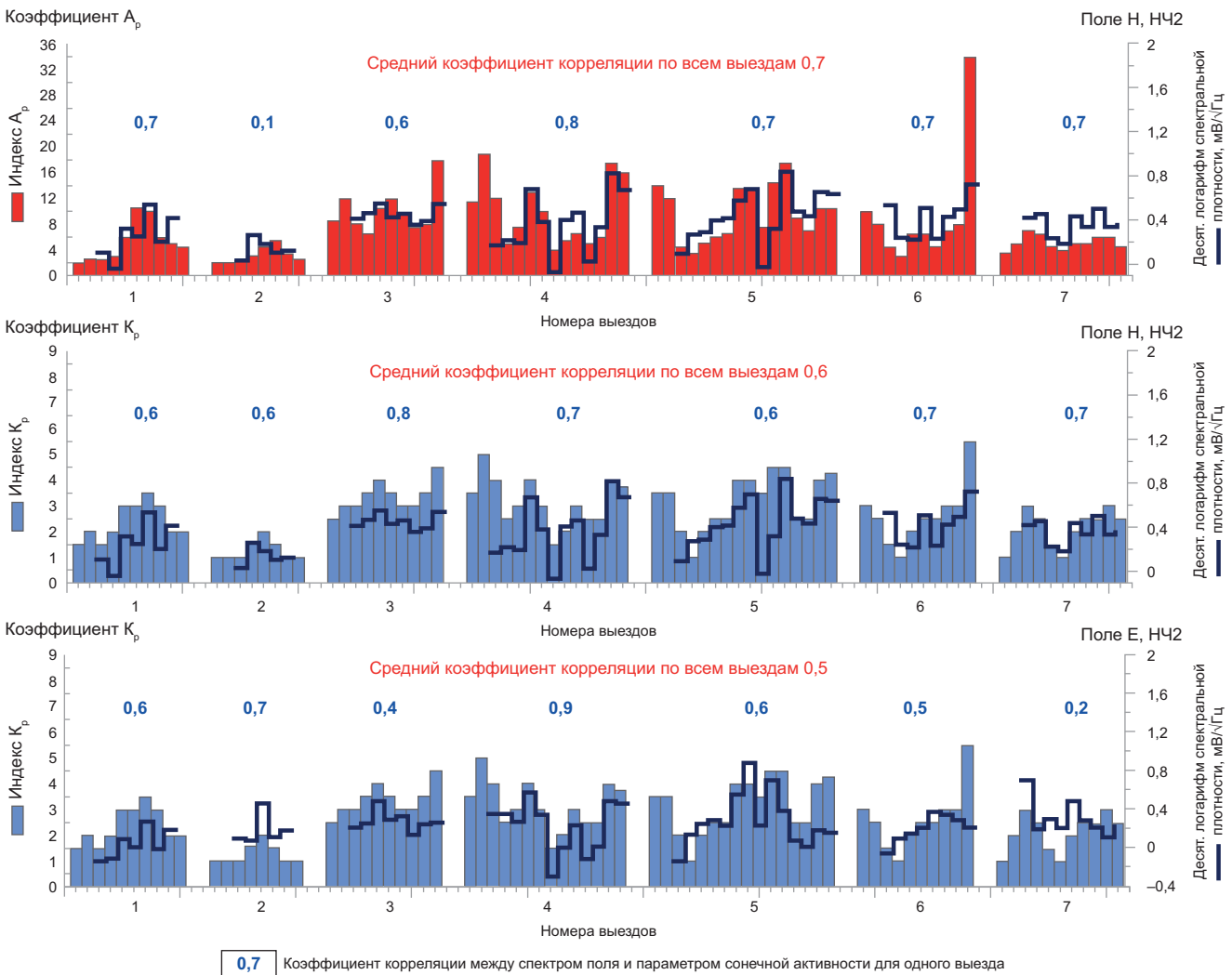


Рис. 6. Графическое сопоставление индексов K_p и A_p с плотностью спектра низких частот магнитного и электрического поля (<0,01 Гц)

На основе анализа коэффициентов корреляции за все выезды (табл. 2), а также графического сопоставления плотности спектров МТ поля и параметров солнечной активности, были сделаны следующие выводы.

Низкие частоты магнитного поля, начиная от 0,1 Гц (НЧ1) и особенно ниже 0,01 Гц (НЧ2), характеризуются высокими коэффициентами корреляции с индексами геомагнитной активности K_p и A_p (табл. 2). Для частот ниже 0,01 Гц коэффициент

корреляции составляет 0,7 (рис. 6). В табл. 3 сведены коэффициенты корреляции для низких частот по отдельным выездам, и показано, что высокая корреляция между этими параметрами подтверждается по всем выездам, на некоторых особенно сильно. Спектральная плотность магнитного поля в среднем частотном диапазоне (СЧ2 от 0,1 до 1 Гц) имеет слабую положительную корреляцию с индексами K_p и A_p (0,3–0,4) и полностью отсутствует для частот выше 1 Гц (ВЧ1, ВЧ2, СЧ1) (табл. 2).

Таблица 3

Коэффициенты корреляции между плотностью спектра низкочастотной составляющей МТ полей, параметрами солнечной активности и качеством результатов обработки данных МТЗ

Выезд	Магнитное поле					Электрическое поле				
	К _р	А _р	РП	Вспышки	QC-QA	К _р	А _р	РП	Вспышки	QC-QA
Низкая частота (НЧ1)										
1 выезд	0,7	0,8	-0,5		0,7	0,4	0,4	-0,6		0,4
2 выезд	0,5	-0,3	0,8		-0,5	0,4	-0,3	0,6		-0,5
3 выезд	-0,1	-0,4	-0,7	-0,1	-0,5	0,0	-0,3	-0,1	0,5	-0,1
4 выезд	0,8	0,8	-0,3	-0,4	0,4	0,8	0,6	-0,6	-0,2	0,6
5 выезд	0,3	0,5	-0,1	-0,3	0,3	0,4	0,6	0,3	0,4	0,5
6 выезд	0,5	0,6	-0,7	-0,5	0,6	0,5	0,2	-0,4	-0,5	0,0
7 выезд	0,1	0,5	0,5	0,6	-0,2	-0,4	0,1	0,7	0,5	0,4
все выезды	0,5	0,5	0,2	0,0	0,3	0,2	0,3	0,5	0,4	0,5
Низкая частота НЧ2										
1 выезд	0,6	0,7	-0,4		0,8	0,6	0,6	-0,5		0,9
2 выезд	0,6	0,1	0,0		0,3	0,7	0,4	-0,1		0,4
3 выезд	0,8	0,6	-0,1	0,4	0,2	0,4	0,2	0,1	0,7	0,1
4 выезд	0,7	0,8	-0,1	-0,5	0,1	0,9	0,8	-0,6	-0,4	0,5
5 выезд	0,6	0,7	0,0	-0,1	0,5	0,6	0,7	0,1	0,4	0,6
6 выезд	0,7	0,7	-0,7	-0,5	0,5	0,5	0,1	-0,1	-0,2	-0,1
7 выезд	0,7	0,7	0,3	0,5	0,2	0,2	0,3	0,5	0,3	0,4
все выезды	0,6	0,7	0,3	0,1	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,5

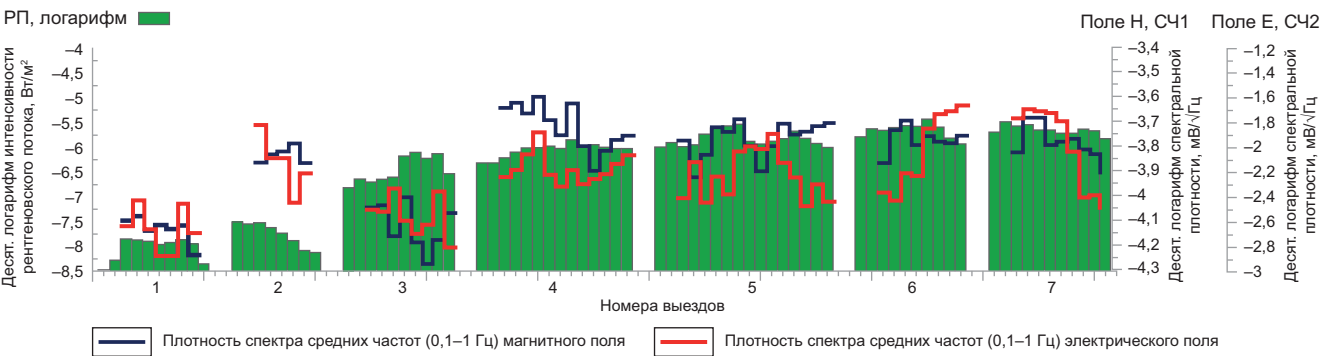


Рис. 7. Графическое сопоставление интенсивности рентгеновского потока (РП) с плотностью спектра средних частот магнитного и электрического поля

Самые низкие частоты в спектре электрического поля характеризуются средними коэффициентами корреляции с индексами К_р и А_р (0,3–0,5), а начиная с частоты 10 Гц и выше, корреляция с индексами геомагнитной активности полностью отсутствует.

Во всем частотном диапазоне наблюдается положительная корреляция между плотностью спектра обеих компонент МТ поля с интенсивностью рентгеновского излучения, а также количеством солнечных вспышек. Наибольшие значения коэффициентов корреляции с рентгеновским потоком (0,6–0,7) фиксируются для среднечастотного диапазона магнитного поля (от 0,1 до 100 Гц), самых высоких (ВЧ1) и средних частот электрического поля (рис. 7). Низкие частоты магнитного поля

практически не имеют корреляции с количеством солнечных вспышек.

Качество результатов обработки данных МТЗ, полученное по оценке программы QC-QA, практически для всех частот имеет положительную корреляцию (>0,3) с плотностью спектра обеих компонент МТ поля (рис. 8). Наиболее высокие коэффициенты корреляции для магнитного поля (0,5–0,6) фиксируются в диапазоне средних частот (0,1–10 Гц), а для электрического поля на высоких частотах (>100 Гц) и на низких частотах (<0,1 Гц). Таким образом, основное влияние на качество данных МТЗ оказывает плотность спектра средних частот магнитного поля, низких и самых высоких частот электрического поля.

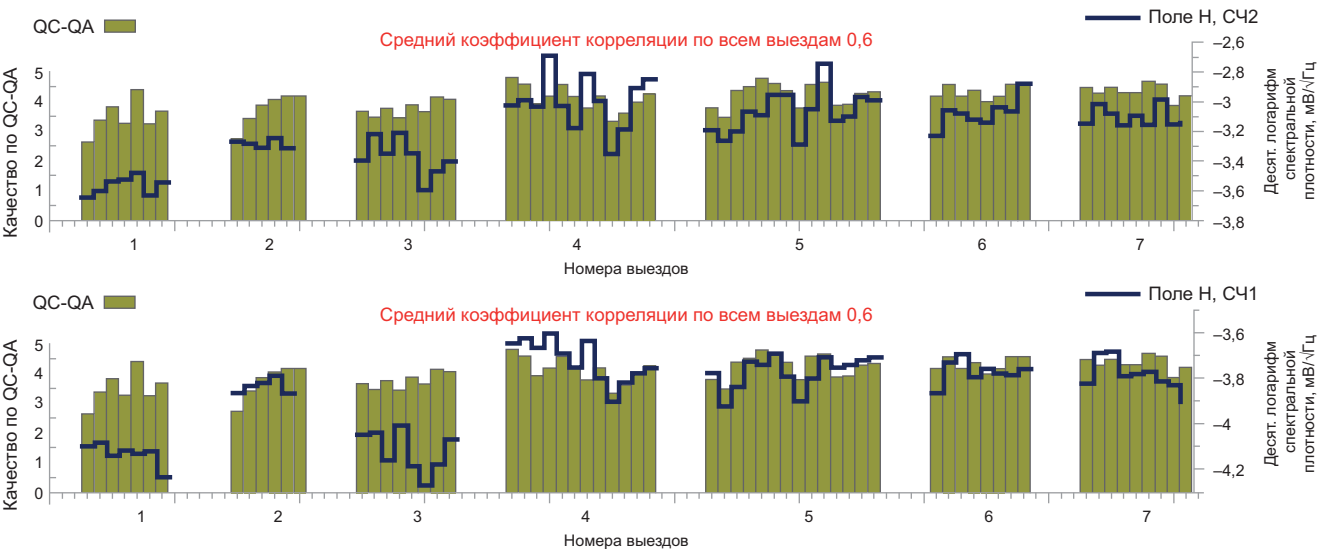


Рис. 8. Графическое сопоставление качества результатов обработки МТ данных в программе QC-QA с плотностью спектра средних частот магнитного поля

Выводы. Обобщая результаты сопоставления плотности спектров электрических и магнитных компонент МТ поля с параметрами солнечной активности по дням, можно сделать следующие выводы.

Плотность спектра электрического и магнитного поля Земли с общим количеством вспышек на Солнце связана слабо. Корреляция всегда положительная, но не высокая. Увеличение количества солнечных вспышек приводит к усилению плотности спектра в области средних частот (0,1–10 Гц). Магнитное низкочастотное поле не реагирует на общее количество вспышек.

Вся спектральная кривая как магнитного, так и электрического поля имеет положительную корреляцию с интенсивностью рентгеновского потока, коэффициент корреляции не опускается ниже 0,3. Максимальные коэффициенты корреляции наблюдаются в диапазоне средних частот МТ поля: в магнитном поле от 0,1 Гц до 100 Гц, а в электрическом от 0,01 Гц до 100 Гц.

Индексы геомагнитной активности K_p и A_p со спектрами высоких частот не имеют корреляции, а на низких частотах наиболее сильно коррелируют с магнитным полем, особенно для частот ниже 0,01 Гц.

В табл. 4 приведены коэффициенты корреляции, вычисленные по тем же принципам, как и для однодневных наблюдений, только осредненные по всем дням. Данная статистика показывает корреляцию между рассматриваемыми параметрами по всем выездам.

Заключение. Индексы геомагнитной активности K_p и A_p имеют высокую корреляцию только с плотностью спектра МТ поля на низких частотах. Для магнитного поля коэффициент корреляции с A_p достигает 0,9–1. Для электрического поля эта зависимость среднего уровня (0,6).

Корреляция между интенсивностью рентгеновского излучения и плотностью спектра растет с по-

Таблица 4

Коэффициенты корреляции между спектрами МТ полей, параметрами солнечной активности и качеством результатов обработки данных МТЗ по оценкам программы QC-QA

ЧД	Магнитное поле					Электрическое поле				
	K_p	A_p	РП	Вспышки	QC-QA	K_p	A_p	РП	Вспышки	QC-QA
ВЧ1	-0,3	0,0	0,3	0,4	0,5	-0,5	-0,1	0,5	0,4	0,6
ВЧ2	-0,3	0,1	0,7	0,6	0,8	-0,5	-0,1	0,3	0,3	0,5
СЧ1	-0,2	0,2	0,6	0,5	0,8	-0,4	0,0	0,5	0,4	0,7
СЧ2	0,1	0,5	0,8	0,7	0,9	-0,4	0,1	0,6	0,5	0,7
НЧ1	0,7	0,9	0,9	0,8	0,8	-0,1	0,4	0,8	0,6	0,8
НЧ2	0,9	1,0	0,9	0,8	0,7	0,4	0,7	0,8	0,7	0,6

нижением частоты и достигает на частотах ниже 1 Гц значений 0,8–0,9. Похожая зависимость наблюдается и для количества вспышек, но уровень корреляции несколько ниже.

Качество передаточных МТ операторов, полученных в результате обработки, тесно связано с плотностью спектра как магнитного, так и электрического полей. Наиболее высокие коэффициенты корреляции фиксируются на средних частотах.

Полученные зависимости между плотностью спектра МТ поля и параметрами солнечной активности показывают высокую положительную корреляцию между ними.

При проектировании работ лучше всего ориентироваться на прогноз рентгеновского излучения и количества солнечных вспышек, а также на прогноз A_p индекса при заинтересованности в самых низких частотах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных синхронных магнитотеллурических зондирований: Дисс. ... канд. техн. наук: М.: МГУ, 2018. 132 с.

История солнечных циклов // <https://www.spaceweatherlive.com/ru/solnechnaya-aktivnost/solnechnyy-cikl/istoriya-solnechnyh-ciklov.html>. Год обращения 2024.

Куликов В.А., Варенцов И.М., Иванов П.В. и др. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований в районе Слободского геодинамического узла (Восточно-Европейская платформа) // Вестник Камчатской региональной ассоциации «Учебно-научный центр». Серия: Науки о Земле, издательство Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (Петропавловск-Камчатский). 2023. Т. 60. № 4. С. 5–21.

Куликов В.А., Варенцов И.М., Иванов П.В. и др. Результаты глубинных магнитотеллурических исследований по профилю Пушкинские Горы — Андреаполь // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 2. С. 136–144.

Куликов В.А., Ионичева А.П., Лубнина Н.В. и др. Новые магнитотеллурические данные для зоны сочленения

Фенноскандии и Сарматии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2021. № 2. С. 3–11.

Описание индексов геомагнитной активности // Мировой Центр Данных по Солнечно-Земной Физике: http://www.wdcb.ru/stp/geomag/indices_description.ru.html. Год обращения 2024.

Солнечная вспышка. Большая Российская энциклопедия // <https://bigenc.ru/c/solnechnaia-vspyshka-cdbcb9?ysclid=mb62leab2l966435399>. Сомов Б.В. 2023. Год обращения 2024.

Сотникова Р.Т. Единая база данных параметров рентгеновских вспышек и групп пятен разных классов (McIntosh) за три цикла солнечной активности 1977–2007 гг. // Солнечно-земная физика. 2013. С. 37–40.

Электроразведка: пособие по электроразведочной практике для студентов геофизических специальностей / Под ред. И.Н. Модина, А.Г. Яковлева. 2-е изд. Т. I. Тверь: Полипресс, 2018. 276 с.

Priest E.R. Flare classification // Solar flare magnetohydrodynamics. Gordon and Breach Science Publishers. 1981. P. 51.

Статья поступила в редакцию 15.11.2024,
одобрена после рецензирования 12.03.2025,
принята к публикации 28.08.2025