

БАЗА ДАННЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В РОССИЙСКОЙ АРКТИКЕ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

DATABASE OF GEOMAGNETIC OBSERVATIONS IN RUSSIAN ARCTIC AND ITS APPLICATION FOR ESTIMATES OF THE SPACE WEATHER IMPACT ON TECHNOLOGICAL SYSTEMS

О.В. Козырева 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия, kozyreva@ifz.ru*

В.А. Пилипенко 

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,
Москва, Россия
Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, pilipenko_va@mail.ru*

М.Н. Добровольский 

*Геофизический центр РАН,
Москва, Россия, m.dobrovolsky@gcras.ru*

А.Н. Зайцев 

*Институт земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН,
Москва, Троицк, Россия, alex.zaitsev1940@mail.ru*

Е.Е. Маршалко 

*Финский метеорологический институт,
Хельсинки, Финляндия, elena.e.marshalko@gmail.com*

O.V. Kozyreva

*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS,
Moscow, Russia, kozyreva@ifz.ru*

V.A. Pilipenko

*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS,
Moscow, Russia
Geophysical Center of the RAS,
Moscow, Russia, pilipenko_va@mail.ru*

M.N. Dobrovolsky

*Geophysical Center of the RAS,
Moscow, Russia, m.dobrovolsky@gcras.ru*

A.N. Zaitsev

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere
and Radiowave Propagation of the RAS,
Moscow, Troitsk, Russia, alex.zaitsev1940@mail.ru*

E.E. Marshalko

*Finnish Meteorological Institute,
Helsinki, Finland, elena.e.marshalko@gmail.com*

Аннотация. Создан архив цифровых одноминутных данных советских/российских арктических магнитных станций начиная с 1983 г. по настоящее время. Архив включает данные станций, развернутых вдоль Арктического побережья разными институтами СССР/РФ. Все данные унифицированы, разбиты на суточные файлы, приведены к стандартному текстовому формату IAGA2002 и снабжены графиками для быстрого просмотра (quick-look). Часть данных не входит в существующие мировые базы магнитных данных (SuperMAG, INTERMAGNET). Приведены примеры использования базы данных по Арктике: изучение иррегулярных возмущений и волн диапазона Pc5/Pi3, возбуждающих интенсивные геоиндуцированные токи; оценка искажения потенциала земля—трубопровод при магнитных бурях; наземная поддержка радарных наблюдений ионосферы. Для определения наиболее подверженных геомагнитной опасности регионов рассчитана карта с амплитудами теллурических полей, возбуждаемых однородным магнитным возмущением с единичной амплитудой и периодами 100–1000 с. Эта карта показывает, что геологическое строение существенно влияет на величину геоэлектрических полей, генерируемых магнитными возмущениями. База данных выложена в открытый доступ на анонимном ftp-сайте [ftp://door.gcras.ru/ftp_anonymous/ARCTICA_Rus].

Ключевые слова: магнитные станции, Арктика, геомагнитные пульсации, базы данных, геоиндуцированные токи, теллурические поля.

Abstract. An archive of digital 1-min data from Soviet/Russian Arctic magnetic stations has been created, starting from 1983 to the present. The archive includes data from stations deployed along the Arctic coast by various USSR/Russia institutes. All data are divided into daily files, converted into a standard IAGA2002 format, and provided with graphs for quick-look browsing. Some of the data are not included in the existing world data portals (SuperMAG, INTERMAGNET). We give examples of using the database for the Arctic: study of irregular disturbances and waves of the Pc5/Pi3 range exciting intense geomagnetically induced currents; distortion of the pipe-to-soil potential during magnetic storms; ground support for radar observations of the ionosphere. To assess the regions most susceptible to geomagnetic hazard, we calculated a map with normalized telluric fields for a uniform magnetic disturbance with a unit amplitude and periods 100–1000 s. This map shows that the geological structure significantly affects the magnitude of the geoelectric fields generated by magnetic disturbances. The database is made publicly available on the anonymous FTP site [ftp://door.gcras.ru/ftp_anonymous/ARCTICA_Rus].

Keywords: magnetic stations, Arctic, geomagnetic pulsations, databases, geomagnetically induced currents, telluric fields.

ВВЕДЕНИЕ

Первые магнитные наблюдения на территории России были выполнены еще в XVI в. во время морских экспедиций, организованных английскими купцами в поисках северного пути в Китай. В 1724 г. была создана Санкт-Петербургская академия наук, а уже в 1726 г. начаты первые наблюдения магнитного склонения. С 1830-х гг. регулярные магнитные наблюдения были расширены до восьми пунктов, включая Китай и Аляску. Оцифрованная коллекция данных Главной физической обсерватории в Санкт-Петербурге за 1869–1914 гг. состоит из 70 тыс. цифровых изображений и доступна на сайте [<http://db.izmiran.nw.ru>].

Геомагнитные наблюдения были одними из приоритетных во время Первого международного полярного года (1882–1883 гг.), а также Второго (1932–1933 гг.). Переломным в планетарной геофизике стал Международный геофизический год 1957–1958 гг., когда только на территории СССР и в Антарктиде было развернуто 557 геофизических станций, запущен первый спутник, создана система мировых центров данных, введены в обращение индексы геомагнитной активности AE и Dst . В последующие годы началась эпоха великих географических открытий в понимании структуры и динамики околоземного пространства. При этом спутниковые и наземные магнитометры составляли основу наблюдательных средств.

Сравнительно недавно, начиная с Квебекской энергетической катастрофы 1989 г., было обнаружено, что космическая погода в околоземном пространстве — это не только гигантская природная плазменная лаборатория, но и серьезная опасность для бесперебойного функционирования космических и наземных технологических систем. Наиболее активные проявления геомагнитных возмущений и геоиндуцированных токов (ГИТ) в проводящих заземленных системах наблюдаются на авроральных широтах. Во многих странах активно ведутся исследования по влиянию ГИТ на наземные технологические системы и возможным мерам по уменьшению негативных последствий. Поскольку текущая космическая погода определяется нестационарной и непредсказуемой активностью Солнца, исследования механизмов солнечно-земных связей привели также к созданию нового научного направления — космического климата [Mursula et al., 2011]. Для этого направления крайне важно наличие длительных временных рядов геомагнитных наблюдений.

Уровень и размах отечественных исследований космической погоды во многом еще отстает от мирового. Кроме того, район Российской Арктики не имеет достаточно плотной сети магнитных станций. Тем не менее, в тяжелых арктических условиях российскими научными организациями поддерживаются регулярные наблюдения за магнитным полем Земли. Институт космофизических исследований и аэронавтики (ИКФИА) СО РАН и Институт космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН ведут комплексные наблюдения на сети станций в Восточной Сибири и на Даль-

нем Востоке. Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ) развернул магнитные станции вдоль арктического побережья вплоть до Чукотки. Полярный геофизический институт (ПГИ) КНЦ РАН проводит комплекс наблюдений на Кольском полуострове и Шпицбергене. Новые магнитные станции были установлены Геофизическим центром (ГЦ) РАН [Гвишиани и др., 2018]. Институтом земного магнетизма и распространения радиоволн РАН (ИЗМИРАН) был подготовлен CD-ROM-архив данных российских магнитных станций за 1984–2000 гг. [Амиантов и др., 2001]. Данные были записаны в двоичном формате, к ним прилагалась программа под MS DOS для чтения данных. Благодаря этим усилиям удалось сохранить архив одноминутных данных цифровых магнитовариационных станций, включая данные по проекту «Геомагнитный меридиан 145°» [Зайцев, 1974]. Однако разработанные в то время программные средства для чтения двоичных данных в настоящее время не могут быть использованы, в связи с чем эти данные оказались практически недоступны научному сообществу. В недавнее время для мониторинга влияния космической погоды на технологические системы усилиями ИЗМИРАН были развернуты несколько магнитных станций на Ямале. Однако данные этих разрозненных наблюдений так и не были приведены к удобному для пользователя виду.

Несмотря на то, что мониторинг геомагнитного поля исключительно важен для арктической зоны РФ, уровень ведущихся исследований явно недостаточен. Территория РФ охватывает примерно 1/3 аврорального овала, но число работ с использованием данных российских магнитных станций, по мнению авторов, составляет не более нескольких процентов от общего числа публикаций по физике авроральных явлений в мире. В значительной степени это связано с ограниченной доступностью мировому сообществу и отечественным исследователям данных российских станций [Пилипенко и др., 2019].

В работе описывается новая обобщенная база данных (БД), включающая архив магнитовариационных наблюдений в Российской Арктике, и даны некоторые примеры ее использования для научных и прикладных задач.

ОПИСАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ

В представленной БД собраны результаты наблюдений вариаций геомагнитного поля с 1-минутным разрешением на станциях в Российской Арктике. Географические и исправленные геомагнитные (CGM) координаты станций даны в таблице, а карта с положением станций, включенных в БД — на рис. 1. Данные некоторых станций имеются на портале SuperMAG [<https://supermag.jhuapl.edu>], являются частью сетей IMAGE [<https://space.fmi.fi/image>] и MAGDAS [<http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/magdas>]. Часть данных взята с сайта Центра коллективного пользования «Аналитический центр геомагнитных данных» ГЦ РАН [<http://ckp.gcras.ru>]. Однако данные ряда станций, например на Ямале, в эти архивы

Географические и геомагнитные координаты станций в Российской Арктике рассчитаны по программе [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>] для 2015 г.

Пункт наблюдений	Код	Географические координаты		Геомагнитные координаты		Организация	Сеть
		широта	долгота	широта	долгота		
Амдерма	AMD	69.47	61.42	65.4	137.7	ААНИИ	
Баранов	BRN	79.27	101.75	74.2	174.3	ААНИИ	
Баренцбург	BBG	78.07	14.25	75.6	108.6	ПГИ	
Белое море	WSE	66.55	33.10	63.2	111.5	ГЦ/МГУ	
Белый	BEY	73.30	70.00	69.5	146.8	ИЗМИРАН	
Визе	VIZ	79.29	76.58	74.9	154.9	ААНИИ	
Диксон	DIK	73.54	80.56	67.9	155.7	ААНИИ	
м. Каменный	СКА	68.50	73.60	63.3	148.2	ААНИИ	
Котельный	КТН	75.94	137.71	69.9	201.2	ИКФИА	MAGDAS
Ловозеро	LOZ	67.97	35.08	64.1	114.9	ПГИ	IMAGE
Лопарская	LOP	68.25	33.08	64.1	114.1	ПГИ	
Надым	NAD	65.53	72.50	61.8	145.6	ИЗМИРАН	
Норильск	NOK	69.40	88.40	64.3	162.2	ИСЗФ	
Сабетта	SAB	71.42	72.13	65.2	147.1	ИЗМИРАН	
Салехард	SKD	66.52	66.67	63.0	141.7	ИЗМИРАН	
Сеяха	SEY	70.10	72.50	64.8	147.7	ИЗМИРАН	
Тикси	ТИК	71.59	128.78	65.7	196.9	ИКФИА	MAGDAS
м. Челюскин	ССС	77.72	104.28	71.3	175.0	ААНИИ	
м. Шмидта	СРС	68.88	180.63	64.2	235.1	ИКИР	
Певек	РВК	70.08	170.90	65.0	228.8	ААНИИ	
Харасавэй	КНС	71.11	66.86	67.5	143.1	ИЗМИРАН	
о. Хейса	НС	80.62	58.05	74.7	145.1	ААНИИ	
Чокурдах	СНД	70.62	147.89	64.8	212.4	ИКФИА	MAGDAS

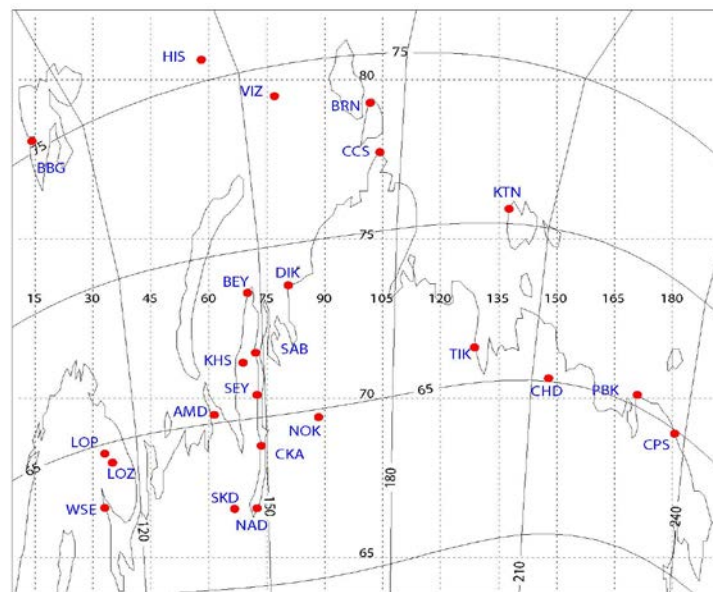


Рис. 1. Магнитные станции в арктической зоне РФ для мониторинга негативного влияния космической погоды на технологические системы. Штриховыми линиями показана географическая сетка координат, сплошными линиями — геомагнитная. Коды станций даны в таблице

не поступают. Естественно, в каждом из перечисленных выше архивов данные хранятся в своем формате.

Все собранные данные были конвертированы в общепринятый ASCII-формат IAGA-2002 [<https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vdat/IAGA2002/iaga2002format.html>]. Названия файлов, которые позволяют легко отбирать нужные для анализа интервалы,

имеют вид STAYYYMMDDvmin.min, где STA — код станции из таблицы; YYY — год; MM — месяц; DD — день. Файлы с данными рассортированы по годам и хранятся в сжатом виде (упаковщиком ZIP), чтобы ускорить процесс скачивания.

На подавляющем числе станций ведутся магнитовариационные наблюдения, при которых измерения абсолютных значений геомагнитного поля не прово-

дятся. На ранних этапах основными компонентными вариометрами на магнитных станциях были приборы на основе кварцевых датчиков (ЦМВС) [Amiantov et al., 1990]. Впоследствии они начали постепенно заменяться феррозондовыми магнитометрами с плоской частотной характеристикой. В последние годы некоторые российские станции постепенно переходят на стандарт международной сети INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org>]. В данных магнитовариационных наблюдений физический смысл имеют только отклонения от базового уровня. Данные в нанотеслах (нТл) приводятся в трехколоночном формате в геомагнитной системе координат (Н, Е, Z): ось Н направлена на геомагнитный полюс; ось Е — на геомагнитный восток; ось Z — вертикально вниз. Магнитограммы всех станций были визуально просмотрены — заведомо бракованные файлы были отброшены. Однако в файлах встречаются скачки уровня, пробелы в данных, кратковременные помехи. Их корректировка требует специального анализа.

Для быстрого просмотра данных, проверки наличия данных для конкретных временных интервалов и отбора событий нарисованы quick-look-магнитограммы. Ниже будут даны примеры файлов построенных магнитограмм H -компоненты в графическом формате. Для общей характеристики условий в межпланетном пространстве из БД OMNI [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>] на тех же графиках показаны вариации плотности плазмы солнечного ветра N_p , скорости солнечного ветра V и вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля B_z . Примеры этих графиков будут показаны ниже для событий, которые важны для проблемы возбуждения ГИТ в линиях электропередач (ЛЭП) и трубопроводах, но физическая природа которых окончательно не выяснена.

ПРИМЕРЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ, ВЫЗЫВАЮЩИХ СУЩЕСТВЕННЫЕ ГИТ

Одним из наиболее значимых факторов космической погоды являются ГИТ в системах технологических проводников, вызванные резкими изменениями геомагнитного поля dB/dt (см. обширную литературу в обзоре [Пилипенко, 2021]). Хотя наибольшие магнитные возмущения на земной поверхности (магнитные бухты) вызываются протяженным авроральным электроджетом, наибольшие всплески ГИТ вызываются мелкомасштабными ионосферными токовыми структурами. Энергия таких импульсных или квазипериодических возмущений много ниже, чем энергия магнитосферных бурь или суббурь, однако быстроменяющиеся поля таких возмущений вызывают всплески ГИТ значительной величины [Belakhovsky et al., 2019]. Примеры таких возмущений даны ниже по данным собранной БД. Рисунки для всех примеров даны в том же формате, как и quick-look-картинки, включенные в БД.

Промышленные компании РФ, заинтересованные в определении возможного влияния геомагнитных возмущений на работу технологических систем на высоких широтах, могут сопоставить свои архи-

вы сбоев с представленной БД. Кроме того, несмотря на скудость геомагнитных наблюдений в арктической зоне РФ, есть периоды, когда покрытие наблюдениями оказывается достаточно плотным (например, в районе Ямала), чтобы изучать как долготную, так и широтную структуры геомагнитных возмущений. Разумеется, представленные примеры имеют иллюстративный характер и далеко не исчерпывают возможные научные задачи, для решения которых может быть использована арктическая БД.

Рi3/Ps6 пульсации

После фазы расширения суббури на крупномасштабные магнитные вариации зачастую наложены иррегулярные квазипериодические пульсации типа Рi3 с характерными временными масштабами 3–15 мин [Saito, 1978]. На рис. 2 показаны quick-look-графики для суббурь 2019.02.09 (левая панель) и 2019.03.02 (правая панель) по данным высокоширотных станций, входящих в описываемую БД. Эти пульсации представляют собой не гармонические колебания, а квазипериодическую серию нелинейных магнитных импульсов с крутыми фронтами. Морфологически близкими к Рi3 являются пульсации Ps6 [Connors et al., 2003]. Благодаря крутым фронтам Рi3/Ps6-импульсов изменчивость поля dB/dt во время этих пульсаций высока и может превышать 20 нТл/с.

Рi3/Ps6-пульсации вызывают квазипериодические всплески ГИТ. Во многих событиях ГИТ достигали экстремальной величины (сотни ампер) не во время начала суббури, а в течение последующей серии Рi3- или Ps6-пульсаций [Сахаров и др., 2021; Apatenkov et al., 2020; Chinkin et al., 2021].

Уединенные магнитные импульсы

При рассмотрении воздействий космической погоды неявно предполагается, что экстремальные геомагнитные поля пространственно-однородны по всей области энергосистемы. Однако часто на фоне общего усиления поля во время суббурь наблюдаются изолированные максимумы в магнитном (с амплитудами >100 нТл) и теллурическом (>1 В/км) полях — магнитные импульсы (magnetic perturbation events, MPEs) [Engebretson et al., 2019]. Эти максимумы сильно локализованы, т. е. амплитудный пик на одной станции может быть в несколько раз больше регионального значения поля в среднем на расстояниях порядка 500 км. На рис. 3 даны примеры таких импульсных возмущений (в ~ 16 и ~ 05 UT) во время умеренной магнитной активности. Физические процессы, которые определяют генерацию этих экстремальных возмущений, изучены недостаточно. Магнитные импульсы обычно связаны с локальной интенсификацией авроральной светимости.

Рс5-пульсации

Хотя околоземная среда представляет собой турбулентную систему, наличие природных МГД-резонаторов и волноводов приводит к появлению квазимонохроматических колебаний в ультранизкочастотном (УНЧ) диапазоне (периоды от секунд до десятков минут). УНЧ-волны и шумы являются неотъемлемой

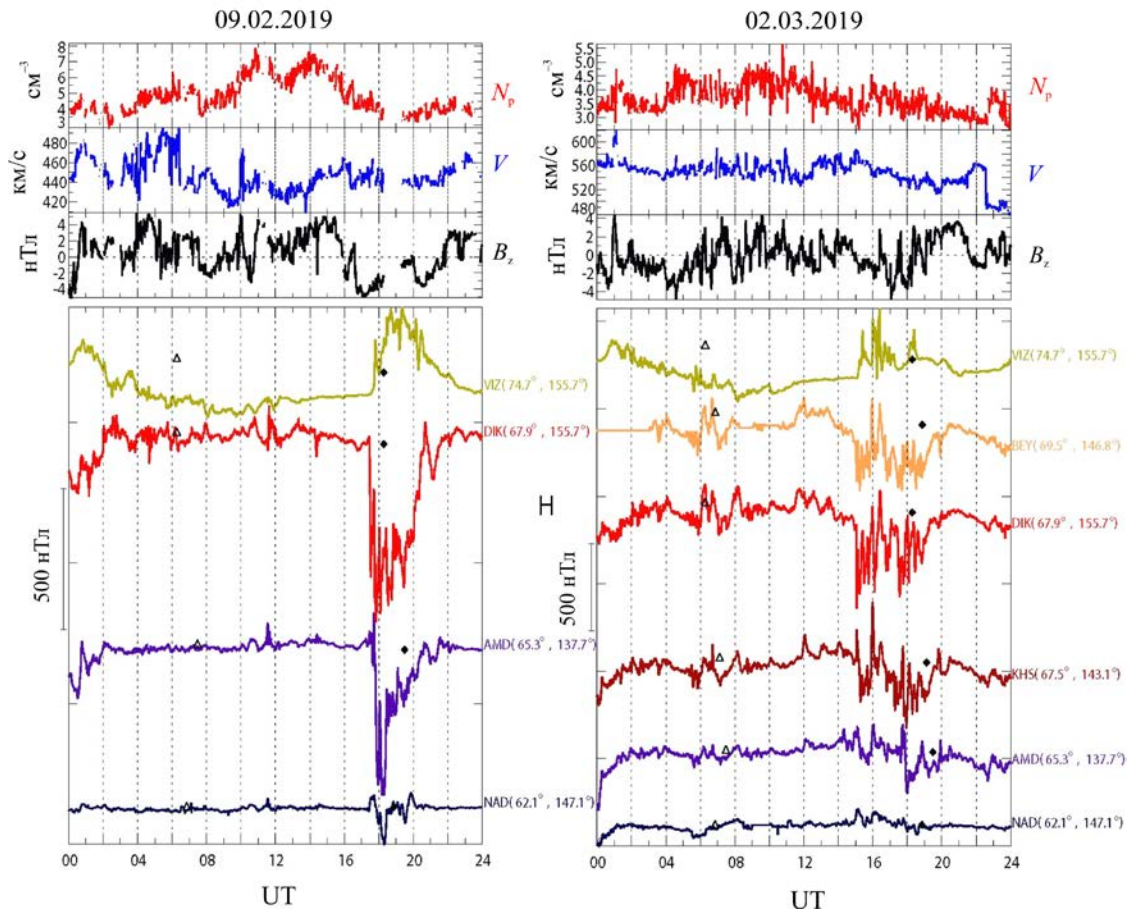


Рис. 2. Пример иррегулярных квазипериодических пульсаций типа P₁₃ на фоне фазы развития суббурь 09.02.2019 (слева) и 02.03.2019 (справа). Верхняя панель на обоих графиках показывает вариации плотности плазмы солнечного ветра N_p , скорости солнечного ветра V , вертикальной компоненты межпланетного магнитного поля B_z . Рядом с кодом станций на нижних панелях указаны геомагнитные координаты станций. Рядом с магнитограммами (H -компонента) треугольниками показан локальный полдень на каждой станции, ромбами — местная полночь

составляющей электромагнитного окружения планеты. Наблюдаемые на земной поверхности УНЧ-пульсации геомагнитного поля являются преимущественно отражением МГД-волн в околоземной среде. Эти волны возбуждаются потоком солнечной плазмы, обтекающим магнитосферу, или потоками энергичных частиц, инжектируемых в магнитосферу во время магнитных бурь и суббурь. При этом УНЧ-волны не просто являются индикатором протекающих в околоземной среде динамических процессов, но и активно влияют на их протекание: модулируют потоки захваченной радиации, вызывают высыпание захваченных частиц в атмосферу, ускоряют авроральные электроны, возбуждающие полярные сияния (альвеновская аврора); передают энергию релятивистским «электронам-убийцам» во внешнем радиационном поясе, представляющим серьезную опасность для спутниковой электроники.

На низкочастотной границе УНЧ-диапазона находятся волны типа P₅ (характерные периоды 3–5 мин). Пульсации P₅ наблюдаются преимущественно на авроральных широтах и являются собственными модами альвеновских колебаний силовых линий, запертыми между сопряженными ионосферами. Эти альвеновские колебания длятся около нескольких часов, локализованы по широте в обла-

сти с масштабами 200–300 км, их амплитуда быстро спадает к низким широтам. Пример длительных квазимонохроматических пульсаций P₅ для 22.02.2019 дан на рис. 4.

Благодаря высокой изменчивости магнитного поля P₅-пульсаций величина ГИТ в ЛЭП при их появлении повышается и может превышать 10 А [Сахаров и др., 2021]. Длительное существование ГИТ умеренной интенсивности, вызванных геомагнитными P₅-пульсациями, может быть более опасным для долговременной эксплуатации электрических сетей и трубопроводов, чем кратковременные всплески ГИТ во время начал суббурь и бурь, из-за кумулятивных эффектов — коррозии и преждевременного старения высоковольтных трансформаторов.

СОВМЕСТНЫЕ РАДАРНЫЕ И ГЕОМАГНИТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Магнитные станции на Ямале находятся в поле зрения когерентного декаметрового радара ИСЗФ СО РАН, находящегося на территории обсерватории Аркти [http://sdrus.iszf.irk.ru] [Бернгардт и др., 2020]. Обсерватория Аркти в Свердловской обл. принадлежит Институту геофизики УрО РАН (географические координаты

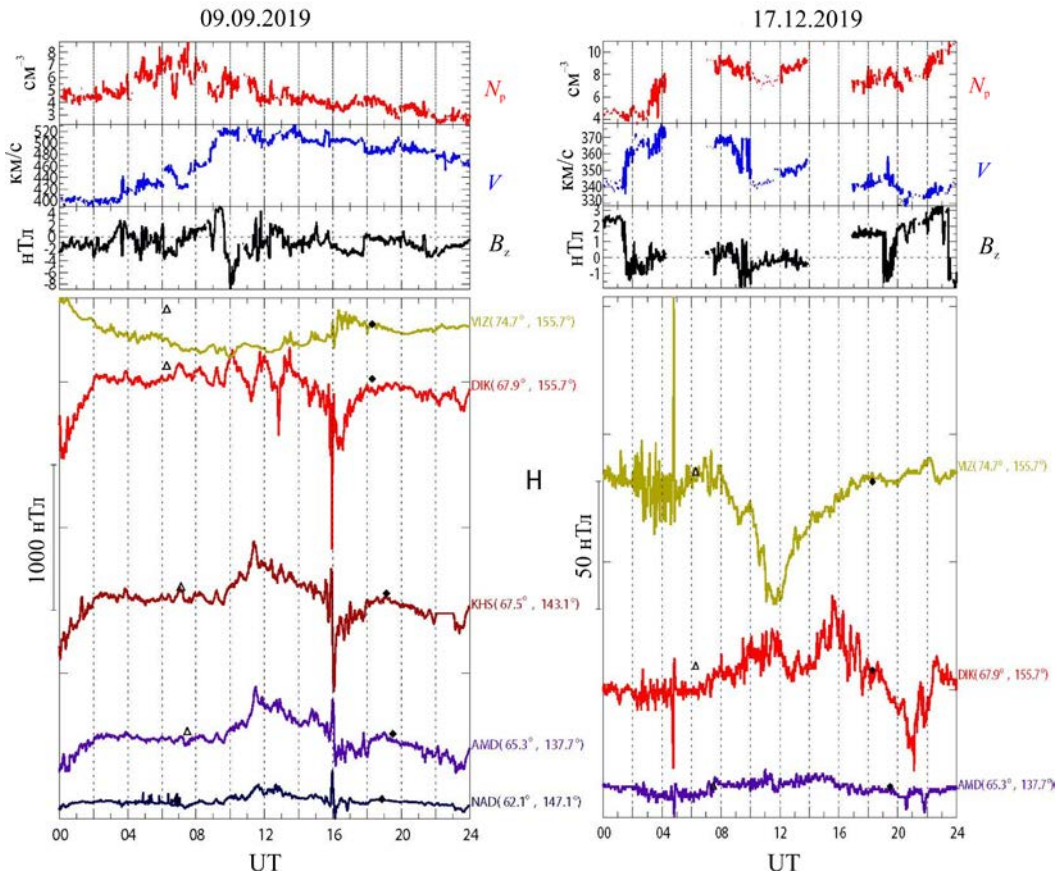


Рис. 3. Пример локализованных магнитных импульсов (МРЕ), зарегистрированных 09.09.2019 (слева) и 17.12.2019 (справа). Формат рисунка такой же, как на рис. 2

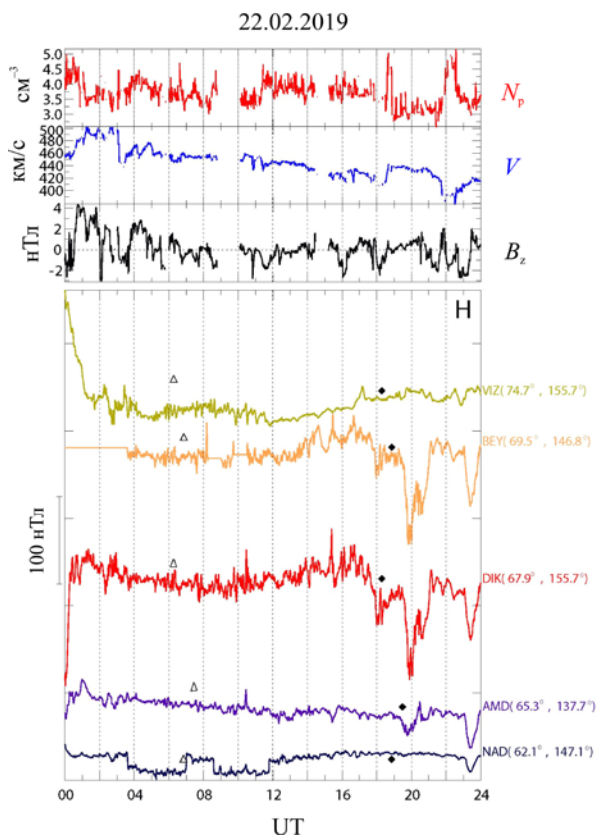


Рис. 4. Пример квазимонохроматических пульсаций Pc5 (H -компонента), зарегистрированных 22.02.2019

координаты 56.41° E, 58.54° N). Поле зрения радара и попадающие в него магнитные станции показаны на рис. 5. Опыт длительной эксплуатации этого радара показал его высокую чувствительность для регистрации движений ионосферной плазмы, вызываемых магнитосферными импульсами и волнами [Челпанов и др., 2019]. Поэтому описываемая база геомагнитных данных будет полезна для сопоставления ионосферных и геомагнитных УНЧ-волн и импульсов. Использование синхронных наблюдений вариаций ионосферного электрического поля и наземного геомагнитного поля дает возможность получить важную информацию о дополнительном физическом параметре возмущения — кажущемся импедансе. Оценка импеданса возмущения дает принципиальную возможность определить его физическую природу [Pilipenko et al., 2012].

ВАРИАЦИИ ГЕОМАГНИТНОГО И ТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ КАК ИСТОЧНИК ГИТ: МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕНИЙ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Современные энергетические системы — это громадная сеть со сложной топологией, которая покрывает обширные территории земной поверхности, локальные геоэлектрические свойства которой могут различаться до пяти порядков величины. Удельная

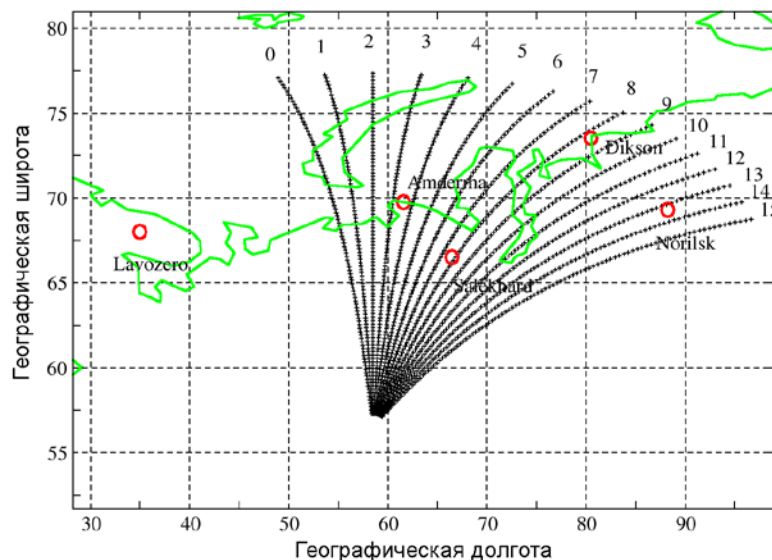


Рис. 5. Поле зрения когерентного декаметрового радара ИСЗФ СО РАН и положение магнитных станций. Цифрами помечены номера лучей

электропроводность в поверхностных слоях Земли колеблется от $\sim 10^{-4}$ См/м на гранитных основаниях до ~ 3 См/м в океане. Геоэлектрические поля, индуцированные в поверхностных слоях Земли во время магнитных суббурь, могут нарушать работу электрических сетей, а появление в будущем экстремально интенсивной магнитной бури может даже привести к масштабной потере энергетических мощностей. Фактически драйвером ГИТ и связанных с ним перегрузок в заземленных электроэнергетических системах является разность потенциалов электрического поля в поверхностных слоях коры. Однако получить прямую информацию о геоэлектрических полях нелегко. В то время как вариации геомагнитного поля отслеживаются с помощью мировой сети магнитометров, включающей более 300 станций и обсерваторий [Gjerloev, 2012], регулярные наблюдения теллурических полей пока не так распространены. В принципе, можно рассчитать вариации электрических полей и токов в земной коре по данным магнитометров при наличии информации о геоэлектрическом разрезе. С хорошей точностью для расчета теллурических полей можно воспользоваться импедансным соотношением, которое справедливо в предположении, что горизонтальный масштаб возмущения много больше скин-длины в земной коре. Значительно упрощает ситуацию то, что для практически важных расчетов ГИТ важны интегральные величины разности потенциалов между узлами протяженной системы (не менее нескольких сотен километров) и поэтому необходимые оценки с достаточной точностью можно провести и со сравнительно редкой сетью магнитометров и грубой моделью проводимости.

Наиболее интенсивные всплески ГИТ наблюдались в электрических сетях от геомагнитных возмущений с характерными временными масштабами 1–10 мин [Belakhovsky et al., 2019]. Возмущения электромагнитного поля с такими периодами проникают в поверхностные слои Земли на глубину порядка скин-длины, составляющей от единиц до не-

скольких сотен километров. В средах с низкой проводимостью вероятность негативного воздействия сильных магнитных возмущений резко повышается, так как индуцированные теллурические поля E оказываются больше и наведенные токи преимущественно текут через проводящие элементы промышленных сетей. В приближении плоской волны на поверхности Земли выполняется импедансное соотношение $\mathbf{E} = \mu_0^{-1} \mathbf{Z} \times \mathbf{B}$ между спектральными амплитудами векторов горизонтальных электрических $\mathbf{E} = \{E_x, E_y\}$ и магнитных $\mathbf{B} = \{X, Y\}$ составляющих, где \mathbf{Z} — матрица импеданса [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. В данной работе мы используем 1D-импеданс $Z(f)$

$$\begin{pmatrix} E_x(f) \\ E_y(f) \end{pmatrix} = \mu_0^{-1} \begin{pmatrix} 0 & Z(f) \\ -Z(f) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X(f) \\ Y(f) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Для однородной земной коры с удельным сопротивлением ρ импеданс $Z = \sqrt{-i\mu_0\omega\rho}$ зависит от периода $T = 2\pi/\omega$ падающего возмущения степенным образом $Z(T) \propto T^{-1/2}$. Однако вблизи береговых зон с резким градиентом проводимости следует использовать 3D-импедансы.

Обычно предполагается, что интенсивность ГИТ J пропорциональна производной по времени геомагнитного поля, $J \sim dB/dt$. В реальных ситуациях контур, по которому протекают ГИТ, формируется ЛЭП, контактами заземления, конечными трансформаторами и землей, при этом электрические параметры этих элементов и их зависимость от частоты известны очень приблизительно. Фактическая связь между спектральным составом магнитных вариаций $B(\omega)$, теллурическим электрическим полем $E(\omega)$ и индуцированным током $J(\omega)$ должна быть определена для каждой технологической системы отдельно. Частотная зависимость импеданса приводит к тому, что геоэлектрические свойства подстилающих пород

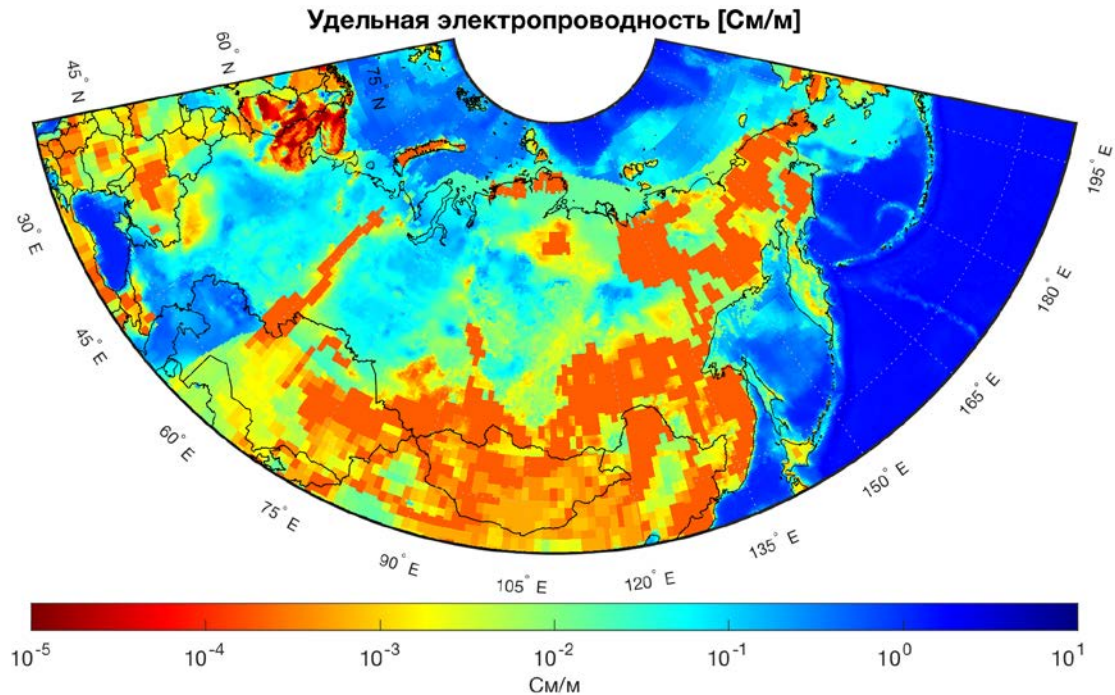


Рис. 6. Карта пространственного распределения усредненной удельной электропроводности верхнего десятикилометрового слоя земной коры σ [См/м] на территории РФ

играют роль фильтра, подавляющего высокие частоты в геомагнитной изменчивости dB/dt [Соколова и др., 2019]. Таким образом, варибельность геомагнитного поля dB/dt не является достаточной характеристикой эффективности геомагнитных вариаций.

Определение импеданса земной поверхности требует проведения специализированного магнитотеллурического зондирования (МТЗ), что было проделано только для отдельных участков земной поверхности. Например, в рамках программы Earth Score проведена магнитотеллурическая съемка территории США на сетке с расстоянием между станциями 70 км [Schultz, 2009]. Затем одновременные измерения геомагнитного и геоэлектрического полей использовались для расчета тензора импеданса [Bedrosian, Love, 2015]. Столь же детальной модели геоэлектрической проводимости для всей территории РФ не существует, поэтому при расчетах геоэлектрических полей приходится пользоваться различными приближенными моделями. Мы воспользовались информацией об импедансах земной коры, вычисленных на основе глобальной модели проводимости [Alekseev et al., 2015] (диапазон глубин от 0 до 100 км) и 1D-модели проводимости [Kuvshinov et al., 2021] (для глубин более 100 км). 3D-модель [Alekseev et al., 2015] включает многие имеющиеся в мировой литературе данные, полученные на основе проведенных МТЗ. Также в 3D-модель были включены данные проводимости верхнего слоя (первые 10 км) модели Фенноскандии SMAP [Korja et al., 2002], которые отсутствовали в оригинальной модели [Alekseev et al., 2015].

Карта пространственного распределения усредненной удельной электропроводности поверхностного десятикилометрового слоя земной коры на терри-

тории РФ показана на рис. 6. Наибольшими сопротивлениями, т. е. малыми значениями проводимости $\sim 10^{-5}$ – 10^{-4} См/м, обладают горные породы в районе Кольского полуострова, Карелии, Урала, Новой Земли и Чукотки. В районе Ямала проводимость достаточно высокая.

Для оценок вариаций геоэлектрического поля, вызванных переменным геомагнитным полем аналогично [Bedrosian, Love, 2015] мы построили синтетическую карту локальных геоэлектрических полей, которые могли бы возбуждаться на всей территории РФ пространственно-однородными вариациями поля с $|\mathbf{B}(f)|=1$ нТл и $T=100$ с, используя связь (1) в частотной области между электрическими $\mathbf{E}(f)$ и магнитными $\mathbf{B}(f)$ полями через комплексный тензор импеданса $Z(f)$. Согласно рассчитанной карте теллурической опасности (рис. 7), наибольшие значения теллурических полей до $E \sim 5$ мВ/км при том же геомагнитном возмущении должны возбуждаться на северо-западе РФ и на Урале. При этом различие в величинах теллурического поля E для различных точек на северо-западе РФ может составлять 3–4 раза при одинаковых амплитудах магнитного возмущения. В районе Ямала теллурические поля достаточно слабые $E \sim 0.5$ мВ/км. Внешнее магнитное возмущение с $T=1000$ с дает меньшие амплитуды теллурических полей (рис. 8).

Проведенные расчеты показывают, что геологическое строение существенно влияет на интенсивность геоэлектрических полей, генерируемых магнитными бурями. Построенная карта в сочетании с созданной базой геомагнитных данных позволяет просто без всяких расчетов оценить возможные риски от ГИТ при различных возмущениях геомагнитного поля для любого региона. Для этого достаточно для интересу-

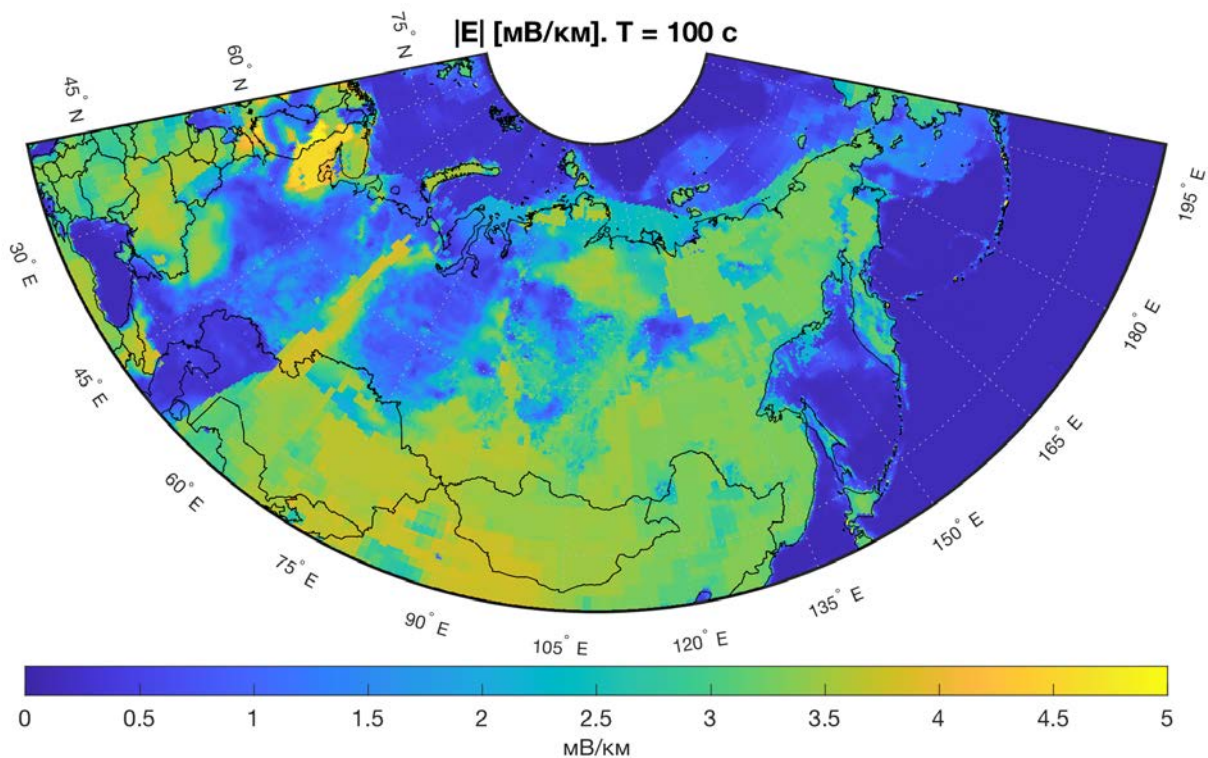


Рис. 7. Карта теллурических полей E [мВ/км], возбуждаемых вариациями однородного магнитного поля с периодом $T=100$ с и амплитудой 1 нТл

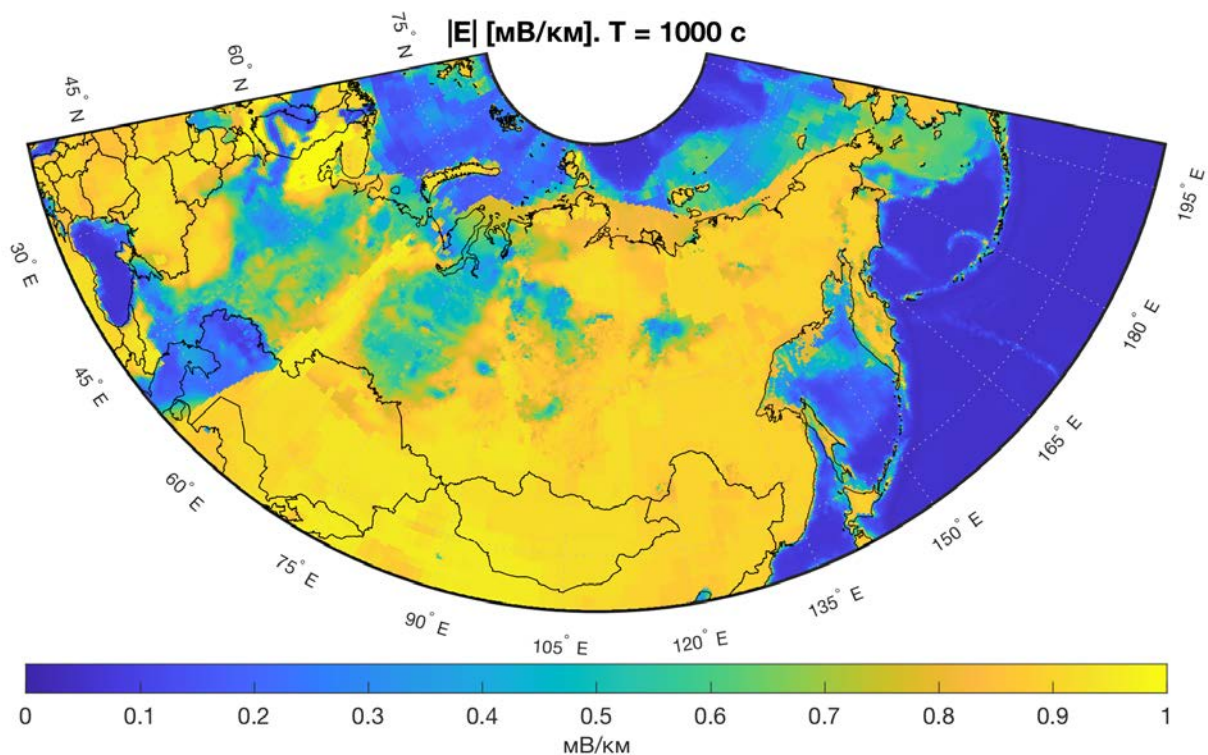


Рис. 8. То же, что на рис. 7, для $T=1000$ с

ющего события из построенных магнитограмм для ближайшей магнитной станции определить величину максимального геомагнитного возмущения и из карты с нормированным откликом на магнитное возмущение

с характерным временным масштабом (100 или 1000 с) оценить возможную величину теллурического поля. Эта карта позволяет промышленным предприятиям лучше предвидеть реакцию на магнитные бури.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ГЕОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ СНИЖЕНИЯ РИСКА ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ ОТ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Геомагнитные возмущения и связанные с ними вариации геоэлектрического поля создают колебания потенциала почва—труба (ППТ), которые выводят напряжение трубопровода из безопасного диапазона защиты от электрокоррозии. Обычно катодная защита подпитывает отрицательный потенциал порядка 1–2 В. При нарушениях в работе катодной защиты в трубопроводах усиливается коррозия в точках заземления или повреждения изоляции и выходят из строя электронные системы контроля. Эти проблемы особенно актуальны для Ямала и арктического шельфа в Баренцевом и Карском морях, так как эти регионы являются центрами систем добычи и транспортировки.

В научном доступе информации о воздействии ГИТ на трубопроводы не так много. Тем не менее, накопленная информация свидетельствует о том, что во время геомагнитных бурь изменения ППТ могут быть достаточно большими, чтобы вывести трубопровод в незащищенный режим в течение продолжительного времени. К примеру, на трубопроводе в Квебеке (Канада) коррозионное повреждение одной из секций развилось через пять лет эксплуатации вместо ожидаемых 20–30 лет [Trichtchenko, Boteler, 2002]. Во время сильных бурь в ноябре 2004 г. на трубопроводе в Австралии в течение ~12 ч флуктуации ППТ примерно в три раза превышали установленные пределы [Boteler, Trichtchenko, 2015].

Наиболее длительные исследования эффектов космической погоды проводились на финском газопроводе в 1998–1999 гг. [Pulkkinen et al., 2001]. По расчетам Lehtinen, Pirjola [1985] для электрического поля 1.0 В/км должны возбуждаться токи порядка 50 А в этом трубопроводе и до 25 А в заземлении, которые при нарушении изоляции могут привести к заметному изменению времени коррозионного разрушения. Действительно, количество случаев развития значительных (>10 А) токов в трубопроводе в южной Финляндии хорошо коррелирует с числом солнечных пятен, что подтверждает прямую связь этих токов с солнечной и магнитной активностью [Viñjanen et al., 2006]. На Аляске обнаружено, что во время сильных магнитных возмущений в трубопроводе возникают всплески тока до 200 А [Campbell, 1980]. На трубопроводе в Альберте (Канада) возникли сбои в работе катодной защиты, связанные с геомагнитными возмущениями [Sharpa, 1992]. На трубопроводе в Норвегии было обнаружено, что ППТ испытывает флуктуации с амплитудой ~5 В во время магнитных возмущений [Henriksen et al., 1978]. Сильные геомагнитные возмущения могут создавать проблемы для технологических систем даже на средних широтах. Для трубопровода в северной Баварии пиковые значения тока в трубе при среднем уровне

геомагнитного возмущения достигали 12 А, а во время главной фазы магнитной бури вариации ППТ составили 3 В [Brasse, Junge, 1984]. В РФ не так много публикаций, отражающих результаты измерений наведенных токов в трубопроводах или изменений ППТ. Ток величиной до 3.2 А был зарегистрирован методом дифференциальной магнитометрии в газопроводе вблизи Якутска во время геомагнитного возмущения [Муллаяров и др., 2006]. На участке магистрального газопровода Бованенково—Ухта во время геомагнитного возмущения измеряемые потенциалы испытывали изменения во времени с амплитудой до 10 В [Ивонин, 2015].

Таким образом, влияние геомагнитных вариаций, обусловленных магнитосферными возмущениями, следует учитывать при организации системы катодной защиты трубопроводов. Воздействие геомагнитных возмущений может проявляться как непосредственно (выход из строя аппаратуры управления), так и иметь длительный кумулятивный характер (электрокоррозия) [Gummow, Eng, 2002]. Для оценки степени воздействия геомагнитных и геоэлектрических полей на конкретную систему представляется целесообразным, используя скопированную БД и архив регистрации ГИТ или потенциала трубопровода, построить регрессионную статистическую модель, которая позволит оценивать возмущения в конкретной системе при заданных вариациях геомагнитного поля [Воробьев и др., 2019].

Начало освоения запасов углеводородов на Ямале подводит к необходимости учета влияния космических факторов на все сложные системы, начиная от геофизической разведки до навигации и наклонного бурения. В частности, необходимы расчеты, насколько предположительно меняется ППТ в районе Ямала при сильных суббурях и надо ли этот эффект учитывать при поддержании катодного потенциала для защиты от электрокоррозии. Исходя из построенной карты амплитуд теллурических полей, можно оценить возможные вариации ППТ при геомагнитных возмущениях. В принципе, для этого необходим расчет модели индукции в заземленном проводнике [Lehtinen, Pirjola, 1985; Boteler, 2013]. Для грубых оценок можно ограничиться более простым подходом. Анализ работы катодной защиты в нефтепроводе [Hejda, Vochnicek, 2005] показал, что рассчитанное теллурическое поле в приближении плоской волны и однородной проводимости Земли линейно пропорционально измеренному ППТ. Перенос найденное ими соотношение на условия Ямала, получаем, что потенциал, создаваемый теллурическими полями, может превысить поддерживаемый между трубопроводом и землей потенциал ~2 В при $E > 0.5$ В/км. Согласно построенной карте (см. рис. 7), для этого необходимо геомагнитное возмущение ~500 нТл с временным масштабом ~100 с.

Хотя российский сектор INTERMAGNET постепенно расширяется [Гвишиани, Лукьянова, 2015], в арктической зоне РФ до сих пор нет магнитной обсерватории такого класса. Новая геомагнитная обсерватория должна войти в состав научного комплекса международной арктической станции

«Снежинка», которая строится в Ямало-Ненецком округе, на восточных склонах Полярного Урала [<https://arctic-mipt.com>]. В ближайшей перспективе важнейшей задачей расширения геомагнитных наблюдений в Российской Арктике является завершение перевода станций на передачу данных в режиме реального времени [Алешин и др., 2020]. Это позволит давать непрерывный прогноз ожидаемого уровня ГИТ и ППТ для ключевых технологических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании базы магнитных данных по арктической зоне РФ авторы преследовали следующие цели: сделать результаты наблюдений легко доступными для широкого круга пользователей; повысить эффективность научных и прикладных исследований за счет массового использования данных магнитных станций; частично заполнить белые пятна в мировой сети геомагнитных наблюдений; повысить научную отдачу от многолетних работ по регистрации геомагнитного поля на высоких широтах. Вся БД, магнитограммы, параметры солнечного ветра и геоэлектрическая модель земной коры находятся в свободном доступе на анонимном ftp-сайте [ftp://door.gcras.ru/ftp_anonymous/ARCTICA_Rus]. Используя базу магнитных данных и геоэлектрическую модель, исследователь может как самостоятельно рассчитать возмущение теллурических полей в Российской Арктике за любой период, так и воспользоваться для грубых оценок картой нормированных возмущений и построенными магнитограммами. Благодаря легкому доступу к данным, простому формату, удобной графике и вспомогательным материалам эта БД может быть полезным дополнением к глобальным порталам геомагнитных данных INTERMAGNET, SuperMAG, IMAGE, MAGDAS. БД постоянно дополняется, поэтому авторы будут признательны за любые предложения по ее улучшению и развитию. В случае проблем с доступом к ftp-серверу следует обращаться к авторам. При использовании БД просьба давать ссылку [<https://doi.org/10.2205/Rus-Arctic-1-min-DB>].

Работа поддержана госзаданиями ИФЗ РАН (ПВА) и ГЦ РАН (ДВН), грантом РФФИ 20-05-00787 (КОВ) и проектом 314670 Академии наук Финляндии (МЕЕ). Благодарим Соколова Е.Ю. за полезные обсуждения и обоих рецензентов за конструктивные замечания. Выражаем признательность всем организациям, предоставившим цифровые геомагнитные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алешин И.М., Иванов С.Д., Корягин В.Н. и др. ИТ-инфраструктура сети геомагнитных обсерваторий. *Геофизические исследования*. 2020. Т. 21, № 3. С. 50–65. DOI: [10.21455/gr2020.3-4](https://doi.org/10.21455/gr2020.3-4).

Амиантов А.С., Зайцев А.Н., Одинцов В.И., Петров В.Г. *Вариации магнитного поля Земли — база цифровых данных магнитных обсерваторий России за период 1984–2000 гг.* CD-ROM. М.: ИЗМИРАН, 2001. 52 с.

Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. *Модели и методы магнитотеллурики*. М.: Научный мир, 2009. 680 с.

Бернгардт О.И., Куркин В.И., Кушнарев Д.С. и др. Декаметровые радары ИСЗФ СО РАН. *Солнечно-земная физика*. 2020. Т. 6, № 2. С. 79–92. DOI: [10.12737/szf-62202006](https://doi.org/10.12737/szf-62202006).

Воробьев А.В., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Статистические взаимосвязи вариаций геомагнитного поля, аврорального электроджета и геоиндуцированных токов. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 48–58. DOI: [10.12737/szf-51201905](https://doi.org/10.12737/szf-51201905).

Гвишиани А.Д., Лукьянова Р.Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: российский сегмент. *Физика Земли*. 2015. № 2. С. 3–20. DOI: [10.7868/S0002333715020040](https://doi.org/10.7868/S0002333715020040).

Гвишиани А.Д., Соловьев А.А., Сидоров Р.В. и др. Успехи организации геомагнитного мониторинга в России и ближнем зарубежье. *Вестник Отделения наук о Земле РАН*. 2018. Т. 10, № NZ4001. DOI: [10.2205/2018NZ000357](https://doi.org/10.2205/2018NZ000357).

Зайцев А.Н. Проект «Геомагнитный меридиан». *Вестник АН СССР*. 1974. № 4. С. 92–94.

Ивонин А.А. Влияние геомагнитного поля Земли на защиту от коррозии МГ ООО «Газпром трансгаз Ухта». *Коррозия «Территории Нефтегаз»*, 2015. № 1. С. 88–89.

Муллаярлов В.А., Козлов В.И., Григорьев Ю.М., Ромащенко Ю.А. Индуцированный в газопроводе ток от большого магнитного возмущения 21.01.05. *Наука и образование*. 2006. № 1 (41). С. 53–55.

Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2021. Т. 7, № 3. С. 73–110. DOI: [10.12737/szf-73202106](https://doi.org/10.12737/szf-73202106).

Пилипенко В.А., Красноперов Р.А., Соловьев А.А. Проблемы и перспективы геомагнитных исследований в России. *Вестник ОНЗ РАН*. 2019. Т. 11, NZ1103. DOI: [10.2205/2019NZ000362](https://doi.org/10.2205/2019NZ000362).

Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. Геомагнитные пульсации Pc5/Pi3 и геоиндуцированные токи. *Изв. РАН. Серия физическая*. 2021. Т. 85, № 3. С. 445–450. DOI: [10.31857/s0367676521030236](https://doi.org/10.31857/s0367676521030236).

Соколова Е.Ю., Козырева О.В., Пилипенко В.А. и др. Вариации геомагнитных и теллурических полей в северо-западных регионах России при возмущениях космической погоды: связь с геоэлектрической структурой и индуцированными токами в ЛЭП. *Геофизические процессы и биосфера*. 2019. Т. 18, № 4. С. 66–85. DOI: [10.21455/GPB2019.4-7](https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-7).

Челпанов М.А., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю., Магер О.В. Наблюдения магнитосферных волн, распространяющихся в направлении дрейфа электронов, с помощью Екатеринбургского когерентного радара. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 1. С. 68–76. DOI: [10.12737/szf-51201907](https://doi.org/10.12737/szf-51201907).

Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N. Compilation of 3D global conductivity model of the Earth for space weather applications. *Earth, Planets and Space*. 2015. Vol. 67, no. 108. DOI: [10.1186/s40623-015-0272-5](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5).

Amiantov A.S., Odintsov V.I., Zaitzev A.N. The unmanned geophysical data collection platform based on the digital magnetometer CMVS-6. *Physics of Earth and Planetary Interiors*. 1990. Vol. 59. P. 61–65.

Apatenkov S.V., Pilipenko V.A., Gordeev E.I., et al. Auroral omega bands are a significant cause of large geomagnetically induced currents. *Geophys. Res. Lett.* 2020. Vol. 47, no. 6. e2019GL086677. DOI: [10.1029/2019GL086677](https://doi.org/10.1029/2019GL086677).

Bedrosian P.A., Love J.J. Mapping geoelectric fields during magnetic storms: Synthetic analysis of empirical United States impedances. *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42, iss. 23. P. 10160–10170. DOI: [10.1002/2015GL066636](https://doi.org/10.1002/2015GL066636).

Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., et al. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines. *J. Space Weather and Space Climate*. 2019. Vol. 9, no. A18. DOI: [10.1051/swsc/2019015](https://doi.org/10.1051/swsc/2019015).

Boteler D.H. A new versatile method for modelling geomagnetic induction in pipelines. *Geophys. J. International*. 2013. Vol. 193. P. 98–109.

Boteler D.H., Trichtchenko L. Telluric influence on pipelines. *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook*. Ed. R.W. Revie. John Wiley & Sons, Inc. 2015. P. 275–285. DOI: [10.1002/9781119019213.ch21](https://doi.org/10.1002/9781119019213.ch21).

Brasse H., Junge A. The influence of geomagnetic variations on pipelines and an application for large-scale magnetotelluric depth sounding. *J. Geophys.* 1984. Vol. 55, no. 1. P. 31–36.

Campbell W.H. Observation of electric currents in the Alaska oil pipeline resulting from auroral electrojet current sources. *Geophys. J. Royal Astronomical Society*. 1980. Vol. 61. P. 437–449.

Chinkin V.E., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., et al. Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2021. Vol. 212. 105514. DOI: [10.1016/j.jastp.2020.105514](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514).

Connors M., Rostoker G., Sofko G., et al. Ps6 disturbances: relation to substorms and the auroral oval. *Ann. Geophys.* 2003. Vol. 21. P. 493–508.

Engebretson M.J., Steinmetz E.S., Posch J.L., et al. Nighttime magnetic perturbation events observed in Arctic Canada: 2. Multiple-instrument observations. *J. Geophys. Res.* 2019. Vol. 124. P. 7459–7476. DOI: [10.1029/2019JA026797](https://doi.org/10.1029/2019JA026797).

Gjerloev J.W. The SuperMAG data processing technique. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, A09213. DOI: [10.1029/2012JA017683](https://doi.org/10.1029/2012JA017683).

Gummow R., Eng P. GIC effects on pipeline corrosion and corrosion control systems. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2002. Vol. 64. P. 1755–1764. DOI: [10.1016/s1364-6826\(02\)00125-6](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(02)00125-6).

Hejda P., Bochnicek J. Geomagnetically induced pipe-to-soil voltages in the Czech oil pipelines during October–November 2003. *Ann. Geophys.* 2005. Vol. 23. P. 3089–3093.

Henriksen J.F., Elvik R., Gransen L. Telluric currents corrosion on buried pipelines. *Proc. 8th Scandinavian Corrosion Congress*. Helsinki, 1978. V. II. P. 167–176.

Korja T., Engels M., Zhamaletdinov A.A., et al. Crustal conductivity in Fennoscandia — a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield. *Earth, Planets and Space*. 2002. Vol. 54. P. 535–558. DOI: [10.1186/BF03353044](https://doi.org/10.1186/BF03353044).

Kuvshinov A., Grayver A., Tøffner-Clausen L., Olsen N. Probing 3-D electrical conductivity of the mantle using 6 years of Swarm, CryoSat-2 and observatory magnetic data and exploiting matrix Q-responses approach. *Earth, Planets and Space*. 2021. Vol. 73. P. 67. DOI: [10.1186/s40623-020-01341-9](https://doi.org/10.1186/s40623-020-01341-9).

Lehtinen M., Pirjola R. Currents produced in earthed conductor networks by geomagnetically induced electric fields. *Ann. Geophys.* 1985. Vol. 3. P. 479–484.

Mursula K., Marsh D., Nandy D., Usoskin I. A review of space climate and an introduction to the papers of the JASTP special issue on space climate. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73. P. 179–181. DOI: [10.1016/j.jastp.2010.11.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.11.002).

Pilipenko V., Belakhovsky V., Kozlovsky A., et al. Determination of the wave mode contribution into the ULF pulsations from combined radar and magnetometer data: Method of apparent impedance. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012. Vol. 77. P. 85–95. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.11.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.11.013).

Pulkkinen A., Viljanen A., Pajunpaa K., Pirjola R. Recordings and occurrence of geomagnetically induced currents in the Finnish natural gas pipeline network. *J. Applied Geophys.* 2001. Vol. 48. P. 219–231.

Saito T. Long-period irregular magnetic pulsation Pi3. *Space Sci. Rev.* 1978. Vol. 21. P. 427–467.

Schultz A. EMScope: A continental scale magnetotelluric observatory and data discovery resource. *Data Sci. J.* 2009. Vol. 8. IGY6–IGY20. DOI: [10.2481/dsj.SS_IGY-009](https://doi.org/10.2481/dsj.SS_IGY-009).

Shapka R. Geomagnetic effects on modern pipeline systems. *Proc. Solar-Terrestrial Predictions Workshop*. Ottawa, May 18–22, 1992. Vol. 1. P. 163–170.

Trichtchenko L., Boteler D.H. Modelling of geomagnetic induction in pipelines. *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1063–1072. DOI: [10.5194/angeo-20-1063-2002](https://doi.org/10.5194/angeo-20-1063-2002).

Viljanen A., Pulkkinen A., Pirjola R., et al. Recordings of geomagnetically induced currents and a nowcasting service of the Finnish natural gas pipeline. *Space Weather*. 2006. Vol. 4. S10004. DOI: [10.1029/2006SW000234](https://doi.org/10.1029/2006SW000234).

URL: ftp://door.gcras.ru/ftp_anonymous/ARCTICA_Rus (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <http://db.izmiran.nw.ru> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://supermag.jhuapl.edu> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://space.fmi.fi/image> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <http://www.serc.kyushu-u.ac.jp/magdas> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <http://ckp.gcras.ru> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vdat/IAGA2002/iaga2002format.html> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://www.intermagnet.org> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <http://sdrus.iszf.irk.ru> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://arctic-mipt.com> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

URL: <https://doi.org/10.2205/Rus-Arctic-1-min-DB> (дата обращения 10 февраля 2022 г.).

Как цитировать эту статью:

Козырева О.В., Пилипенко В.А., Добровольский М.Н., Зайцев А.Н., Маршалко Е.Е. База данных геомагнитных наблюдений в российской Арктике и ее использование для оценки воздействий космической погоды на технологические системы. *Солнечно-земная физика*. 2022. Т. 8, № 1. С. 39–50. DOI: [10.12737/szf-81202205](https://doi.org/10.12737/szf-81202205).