

УДК 550.372; 550.377; 550.379

ИЗУЧЕНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ НА АНОМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ: АВРОРАЛЬНЫЕ ШИРОТЫ, РЕГИОН ЕНИСЕЙ-ХАТАНГСКОГО ПРОГИБА

© 2022 г. Е. Ю. Соколова^{1, 2, *}, Е. Е. Маршалко³, О. В. Козырева¹, И. С. Куприянов², Д. В. Епишкин⁴, В. А. Пилипенко¹, Г. Е. Слинчук^{4, 5}, Д. В. Яковлев⁴, А. Г. Яковлев^{4, 5}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт (ВНИГНИ), г. Москва, Россия

³Финский Метеорологический Институт, г. Хельсинки, Финляндия

⁴ООО “Северо-Запад”, г. Москва, Россия

⁵МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

*E-mail: sokol_1@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2022 г.

После доработки 12.04.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Представлены результаты анализа изменчивости геоэлектрических (теллурических) полей во время возмущений магнитного поля Земли, обусловленных экстремальными явлениями космической погоды. Областью исследования служит территория Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП), лежащая в полосе авроральных широт, где геомагнитные возмущения характеризуются большой интенсивностью. Хозяйственное освоение ЕХРП – крупной нефтегазоперспективной области Российской Арктики, делает актуальным изучение возможных негативных воздействий космической погоды на будущие инфраструктурные объекты. Наиболее серьезной угрозой для проводящих промышленных конструкций Заполярья будут геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), драйверами которых служат геоэлектрические отклики на быстрые изменения геомагнитного поля. Для изучения изменчивости теллурических полей и получения оценок их экстремальных значений в области ЕХРП использовалась уникальная база данных тензоров магнитотеллурического импеданса, сформированная в ООО “Северо-Запад” по итогам региональной стадии геофизического изучения прогиба и прилегающих территорий. С использованием гармонических аппроксимаций внешнего возбуждения по импедансным оценкам рассчитывались пространственно-частотные распределения геоэлектрических полей на земной поверхности. В результате сопоставления построенных карт с геологическими данными выявлены геолого-структурные области, характеризующиеся наибольшими искажениями теллурического поля. Экстремальные амплитуды геоэлектрических откликов в ряде характерных точек ЕХРП оценивались по временным рядам вариаций теллурического поля, синтезированным по частотным зависимостям импеданса с использованием записей в ближайших стационарных пунктах геомагнитного мониторинга во время магнитных бурь и суббурь. Полученные оценки величин и направлений геоэлектрических полей при возмущениях космической погоды могут использоваться для учета возможных деструктивных эффектов ГИТ при проектировании трубопроводов, линий электропередач и железных дорог.

Ключевые слова: теллурические поля, геоэлектрические неоднородности земной коры, геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), космическая погода, авроральные широты, Енисей-Хатангский региональный прогиб.

DOI: 10.31857/S0002333722050271

ВВЕДЕНИЕ

Теоретический и практический интерес к изучению наземных проявлений космической погоды существенно возрос в 21 в., ознаменованном ускорением хозяйственного освоения высокоширотных регионов Евразии и Северной Америки

[Pirjola et al., 2005; Афанасенков и др., 2018]. В российском Заполярье появляются экспериментальные возможности подобных исследований: восстанавливается сеть стационарных магнитных обсерваторий [Гвишиани, Лукьянова, 2015; Kozyreva et al., 2022] (рис. 1), в рамках нефтегазопроисковых работ ведутся масштабные площад-

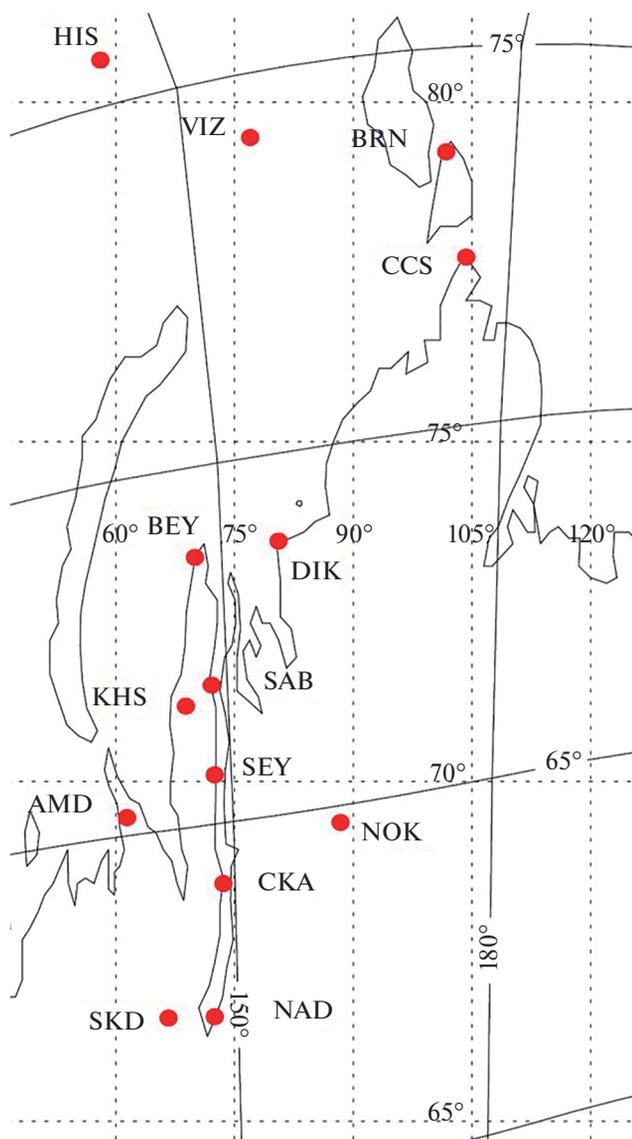


Рис. 1. Станции геомагнитного мониторинга, организованного ИЗМИРАН, ИКИ, НЦ РАН в Центральной Арктической зоне Российской Федерации. Пунктирные линии показывают географическую сетку координат; сплошные линии – геомагнитную. VIZ – о. Визе; HIS – о. Хейса; BRN – Баранов; CCS – м. Челюскин; DIK – Диксон; BEY – Белый; SAB – Сабетта; SEY – Сеяха; SKA – мыс Каменный; AMD – Амдерма; KHS – Харасавей; NOK – Норильск; NAD – Надым; SKD – Салехард.

ные наблюдения магнитотеллурических (МТ) полей [Афанасенков, Яковлев, 2018] (рис. 2).

Слежение за космической погодой, определяемой динамикой процессов в солнечной, межпланетной и околоземной плазме, нацелено на изучение физики солнечно-земных связей, взаимодействия планетарных оболочек, и влияния космических факторов на все сферы жизни на Земле – от биологической до технологической

[Boteler et al., 1998; Клейменова, Козырева, 2008]. Одним из наиболее действенных факторов является геомагнитная активность, которая резко усиливается во время магнитных бурь и суббурь в авроральной области. Экстремальные проявления космической погоды крайне опасны для функционирования космических и наземных технологических систем, так как резкие скачки геомагнитного поля во времени (dB/dt) индуцируют электрические поля в проводящей Земле (геоэлектрические, теллурические поля), в свою очередь генерирующие ГИТ в заземленных низкоомных технологических конструкциях [Cannon et al., 2013; Dimmock et al., 2020; Пилипенко, 2021]. Наиболее значимы угрозы протяженным высоковольтным линиям электропередач (ЛЭП), в которых под действием ГИТ могут возникать интенсивные скачки квазистационарных токов, повреждая высоковольтные трансформаторы [Вахнина, 2012; Pulkkinen et al., 2017]. Подобные явления активно изучаются на единственной в РФ системе измерений ГИТ в ЛЭП “Северный транзит” в Карелии и на Кольском полуострове [Сахаров и др., 2021; Kozyreva et al., 2019; Соколова и др., 2019].

В Центральном секторе Российской Арктики на первый план выходят проблемы ГИТ в нефтяной инфраструктуре. Исследования реакции трубопроводов на геомагнитные возмущения ведутся достаточно давно [Campbell, 1978; Brasse, Junge, 1984; Osella et al., 1998]. Было выявлено, что при протекании ГИТ колебания потенциала труба–почва могут превышать устанавливаемые уровни катодной защиты и что кумулятивный эффект даже небольших превышений влечет значительное усиление электрокоррозии и сокращение срока безаварийной службы трубопровода. Расчет значений избыточных потенциалов и ГИТ в заземленных технологических системах может быть проведен по характеристикам внешнего магнитного возмущения и индуцированным геоэлектрическим полям с привлечением технических параметров промышленных конструкций [Pulkkinen et al., 2001; Trichtchenko, Boteler, 2002; Morales et al., 2020].

Оценка рисков, связанных с космической погодой – комплексная научно-техническая проблема, важность которой растет по мере развития технологий и увеличения степени зависимости от них земной цивилизации. Осмысление причин возникновения и характера проявления источников ГИТ – прерогатива геофизических исследований. Сильные ГИТ в высоких широтах порождают не только крупномасштабными авроральными электроджетами, но и относительно слабыми и мелкомасштабными, однако быстрыми процессами [Белаховский и др., 2018; Kozyreva et al., 2020; Apatenkov et al., 2020; Chinkin et al., 2021; Dimmock et al., 2019]. К основным источникам ГИТ

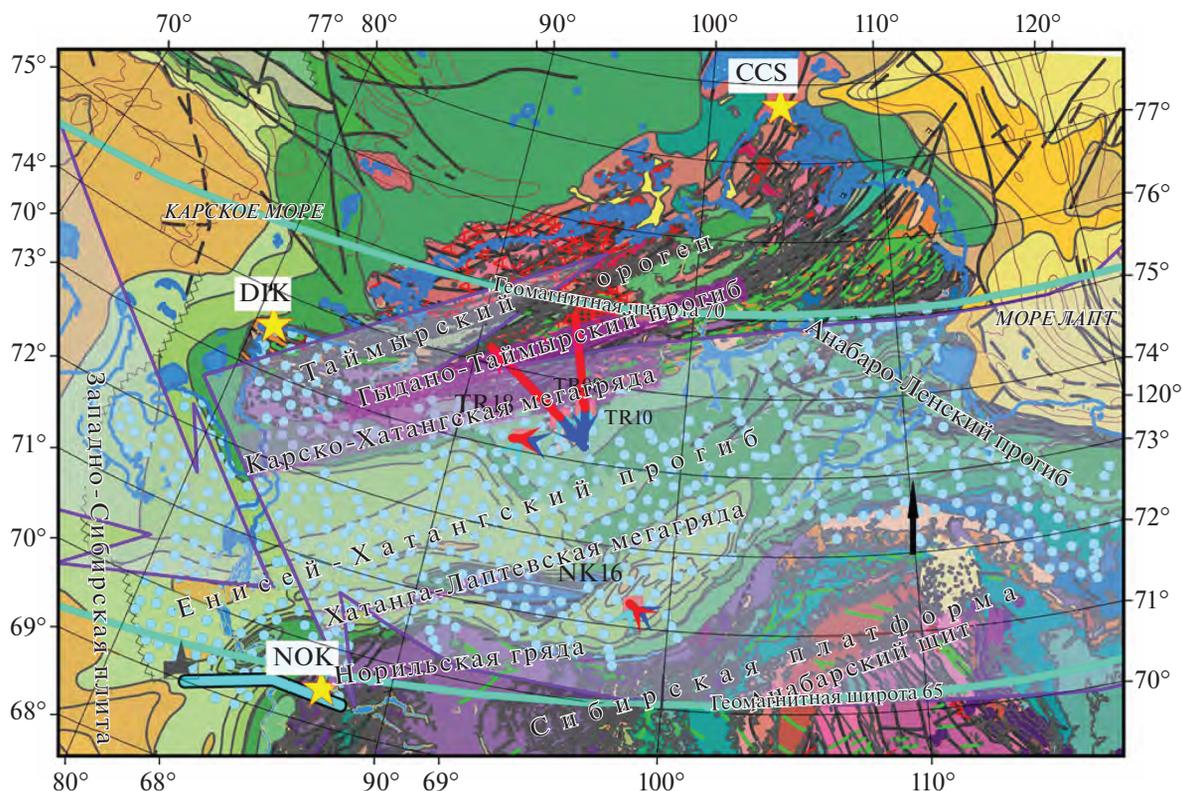


Рис. 2. Положение пунктов массива МТ зондирования региона Енисей-Хатангского прогиба [Слинчук и др., 2021] (голубые точки) и ближайших магнитных станций (DJK, CCS, NOK, желтые звездочки) на фоне геологической карты региона с вынесенными основными элементами тектонического районирования. Для пунктов NK16, TR18, TR08, TR10 показаны вектора геоиндуцированного электрического поля, синтезированного по соответствующим оценкам комплексных импедансов и суточной вариации магнитного поля в DJK во время геомагнитной бури 10–13 мая 2019 г. (рис. 5): синие стрелки – на момент времени 20 ч 08 м, розовые – 22 ч 43 м (черная стрелка – масштабный вектор 1 В/км). Голубыми отрезками показано положение газопровода “Мессояха–Норильск”, а прозрачными сиреневыми стрелками – схематичное положение ионосферных токов суббури (западного и восточного электроджетов) в момент локальной полуночи на меридиане 100 ВД.

здесь относят: взрывные начала авроральных суббурь, нерегулярные пульсации P_3/P_6 , обладающие крутыми фронтами и сложной топологией изменчивости dB/dt , длительные квазимонохроматические пульсации P_5 , способные оказывать кумулятивный деструктивный эффект как на трансформаторы, так и на трубопроводы [Пилипенко, 2021].

Фактическим источником ГИТ является не изменчивость геомагнитного поля dB/dt сама по себе, а теллурические поля, определяемые геоэлектрическим строением региона исследований. Понимание характера ГИТ и реалистичность их прогноза напрямую зависят от полноты представлений о распределении глубинной электропроводности [Bedrosian, Love, 2015; Соколова и др., 2019; Kelbert, 2020]. Необходимые сведения о геоэлектрическом строении могут быть получены из данных МТ зондирования. Для оценки возможных ГИТ по всей территории США были использованы результаты масштабного МТ зондиро-

вания EarthScope [Bedrosian, Love, 2015; Love et al., 2016; Lukas et al., 2018]. Сводный массив данных МТ зондирования канадских провинций Альберта и Британская Колумбия стал основным материалом для расчета теллурических полей в период интенсивных геомагнитных событий в [Cordell et al., 2021]. В этой работе показано преимущество использования экспериментальных оценок МТ импедансов, отражающих реальную трехмерную (3D) картину распределения глубинной электропроводности, по сравнению с часто применяемыми при изучении геомагнитно-индуцированных полей модельными представлениями ограниченной размерности. В последние годы также становится трендом использование построенных по реальным данным региональных или глобальных объемных моделей электропроводности [Püthe, Kuvshinov, 2013; Dimmock et al., 2019; 2020; Marshalko et al., 2021; Kozyreva et al., 2022].

В большинстве современных исследований применяется планарная аппроксимация внешне-

го магнитного возбуждения, в целом, обеспечивающая достаточно адекватные представления о характере геоэлектрических откликов [Dimmock et al., 2019; Marshalko et al., 2021]. Однако для увеличения точности и детальности расчетов драйверов ГИТ требуется учет пространственной неоднородности внешнего поля. Для решения этой задачи, прежде всего, необходимы плотные сети магнитных станций [Pilipenko et al., 1998]. Подходы к созданию и использованию моделей неоднородного источника находят свое развитие в работах [Püthe, Kuvshinov, 2013; Ivannikova et al., 2018; Marshalko et al., 2021].

В настоящей статье описывается опыт изучения пространственно-временных вариаций геоэлектрических полей на обширной территории Енисей-Хатангского регионального прогиба (ЕХРП), являющегося крупнейшей нефтегазоносной депрессией в северном обрамлении Сибирской платформы и для которого проблемы ГИТ будут нарастать в обозримом будущем. В анализе использованы данные уникальных широкополосных МТ зондирований, охватывающих весь прогиб и области, прилегающие к его бортам [Слипчук и др., 2022], а также данные сети магнитных станций, расположенных в Российской Арктике [Kozyreva et al., 2022]. Представлен используемый массив импедансных оценок и интенсивные геомагнитные события, отобранные для анализа; далее описаны подходы к оцениванию геоэлектрических откликов на гармоническое возбуждение и на реальные магнитные возмущения. В итоге обсуждаются результаты приведенного анализа в свете возможных деструктивных эффектов ГИТ по отношению к объектам имеющейся и будущей нефтяной инфраструктуры региона ЕХРП, рассмотрены перспективы уточнения полученных оценок.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИХ АНАЛИЗА

Магнитотеллурические импедансы

В настоящее время МТ зондирования в профильном варианте наряду с сейсморазведкой МОГТ2D стали базовым методом, применяемым на стадии регионального геофизического изучения нефтегазоперспективных областей (НГО) [Афанасенков и др., 2018]. Используемый в рамках настоящего исследования массив МТ данных по Енисей-Хатангской и прилегающим территориям соседних Гыданской и Анабаро-Хатангской НГО был сформирован в ООО “Северо-Запад” по итогам региональной стадии их геофизического изучения в 2008–2020 гг. [Афанасенков, Яковлев, 2018; Слипчук и др., 2022]. При проведении электроразведочных работ применялись высокоточные цифровые станции МТУ канадской ком-

пании “Phoenix-Geophysics” и современные методики зондирования с удаленными базами. По плотности и охвату высокоширотных территорий полученный массив МТ данных не имеет мировых аналогов. В исследовании использовалась площадная коллекция широкополосных частотных зависимостей комплекснозначных МТ импедансов $Z(f, x, y)$ для 654 пунктов (x, y) в узлах нерегулярной сети, со средним расстоянием между ними ~20–70 км (рис. 2).

Регион исследования практически полностью лежит в авроральной зоне, что вызывает дополнительные сложности при оценивании МТ передаточных функций в связи с искажающими эффектами неоднородных источников внешнего возбуждения, главным образом – полей аврорального электроджета и локальных ионосферно-магнитосферных токовых структур. Однако опыт глубинного зондирования BEAR (Фенноскандия), а также недавно проведенный анализ материалов разведочных зондирований в ЕХРП и Лено-Анабарском прогибе показали, что современные процедуры обработки МТ наблюдений способны обеспечивать получение неискаженных оценок передаточных функций (как функций глубинной электропроводности, а не конфигурации источника) при разумном выборе соотношения длительности наблюдений и максимальных периодов оценивания [Sokolova, Varentsov, 2007; Погребных и др., 2022].

Оценки тензоров импеданса $Z(f, x, y)$ в диапазоне периодов от 0.003 с до 1000–1800(2000) по региону ЕХРП были получены по данным 12–24-часовых (и более) наблюдений электромагнитного поля и характеризуются точностью, отвечающей современным стандартам проведения разведочных МТ зондирований: до 5% по амплитудам и 3° по фазам. Основным инструментом для их получения служила программа ЕПИ-Кит [Епишкин, 2016]. Программа использует процедуры предварительной селекции малоискаженных данных и преимущества схем наблюдений с удаленной базой, что способствует подавлению электромагнитных шумов, а также эффектов неоднородности внешнего источника. Глубинность исследований составляет более 20 км в пределах мощного осадочного чехла прогиба и более 60 км в его бортах, сложенных высокоомными образованиями. Типичные широкополосные частотные зависимости компонент $Z(T)$, полученные для четырех пунктов ЕХРП с различными геоэлектрическими разрезами, приведены на рис. 3. Далее они используются для демонстрации методики и результатов исследования.

При интерпретации данных МТЗ по региону ЕХРП – от анализа пространственных распределений эффективного кажущегося сопротивления на разных глубинах проникновения поля (рис. 4а),

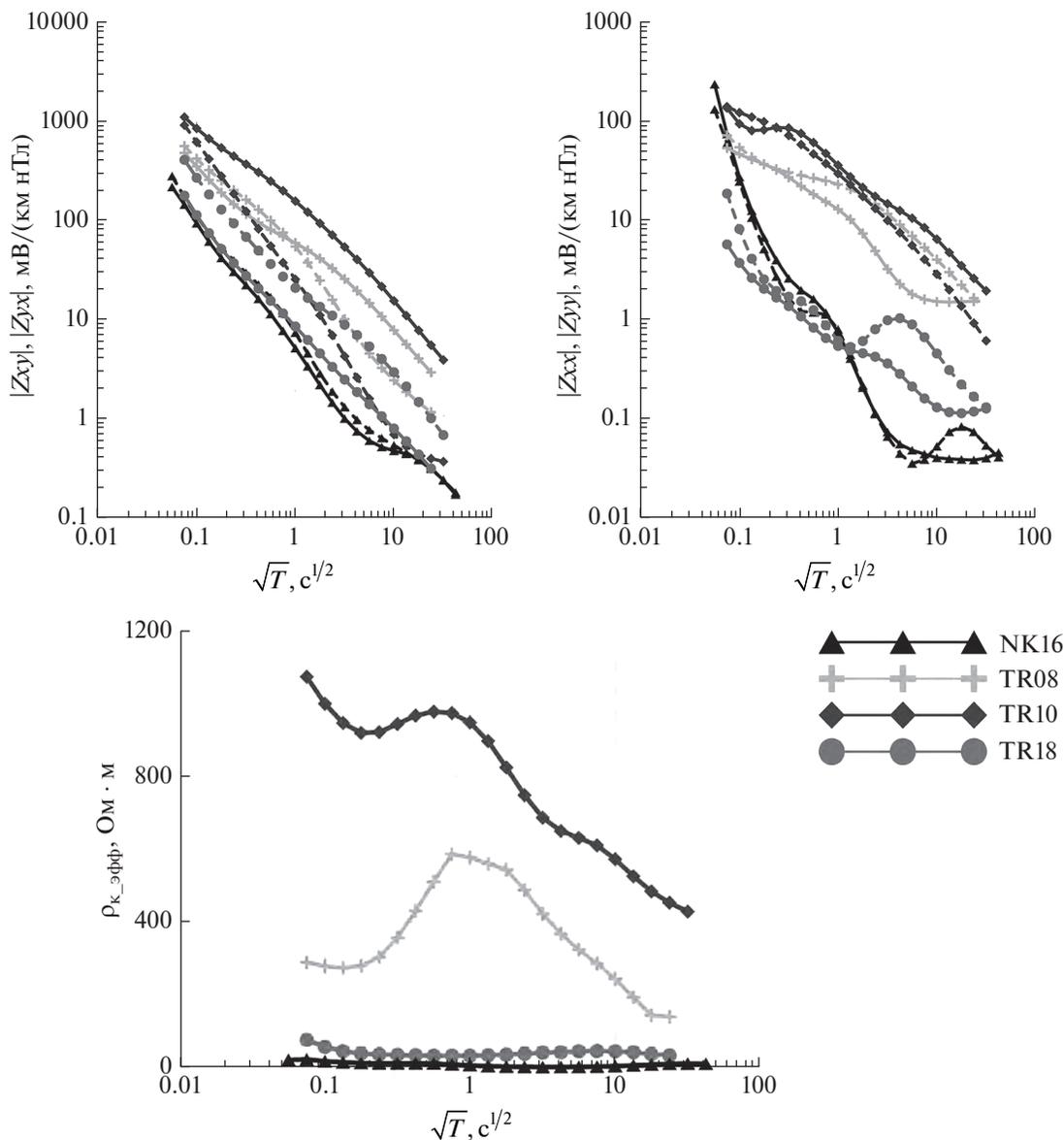


Рис. 3. Частотные зависимости амплитудных компонент импедансного тензора (xy/xx – сплошные кривые, yx/yy – штрихованные) и эффективных кажущихся сопротивлений ($\rho_{k-эфф} = 0.2Z_{эфф}^2$) в пунктах зондирования TR10, TR08, TR18 и NK16 (рис. 2). Оси x, y соответствуют направлениям на географический север и восток.

до построения 3D-моделей глубинной электропроводности (с использованием программы [Kelbert et al., 2014]) – была продемонстрирована их высокая разрешающая способность в отношении многочисленных неоднородностей глубинной электропроводности [Слинчук и др., 2022]. Полученные сведения о структурно-вещественных комплексах с различными проводящими свойствами используются в нефтегазопромышленных целях, а также для построения моделей глубинного строения ЕХРП и его геодинамической истории [Афанасенков, Яковлев, 2018; Андреев и др., 2021].

В то же время большой потенциал этой коллекции импедансов как уникального источника информации об изменчивости геoeлектрического поля – главного параметра для расчета величины ГИТ в объектах нефтяной инфраструктуры региона – еще никогда не исследовался, что делает нашу попытку весьма актуальной.

Магнитные данные

Данные об интенсивных событиях космической погоды, отраженных в повышении геомагнитной активности в пределах изучаемой области

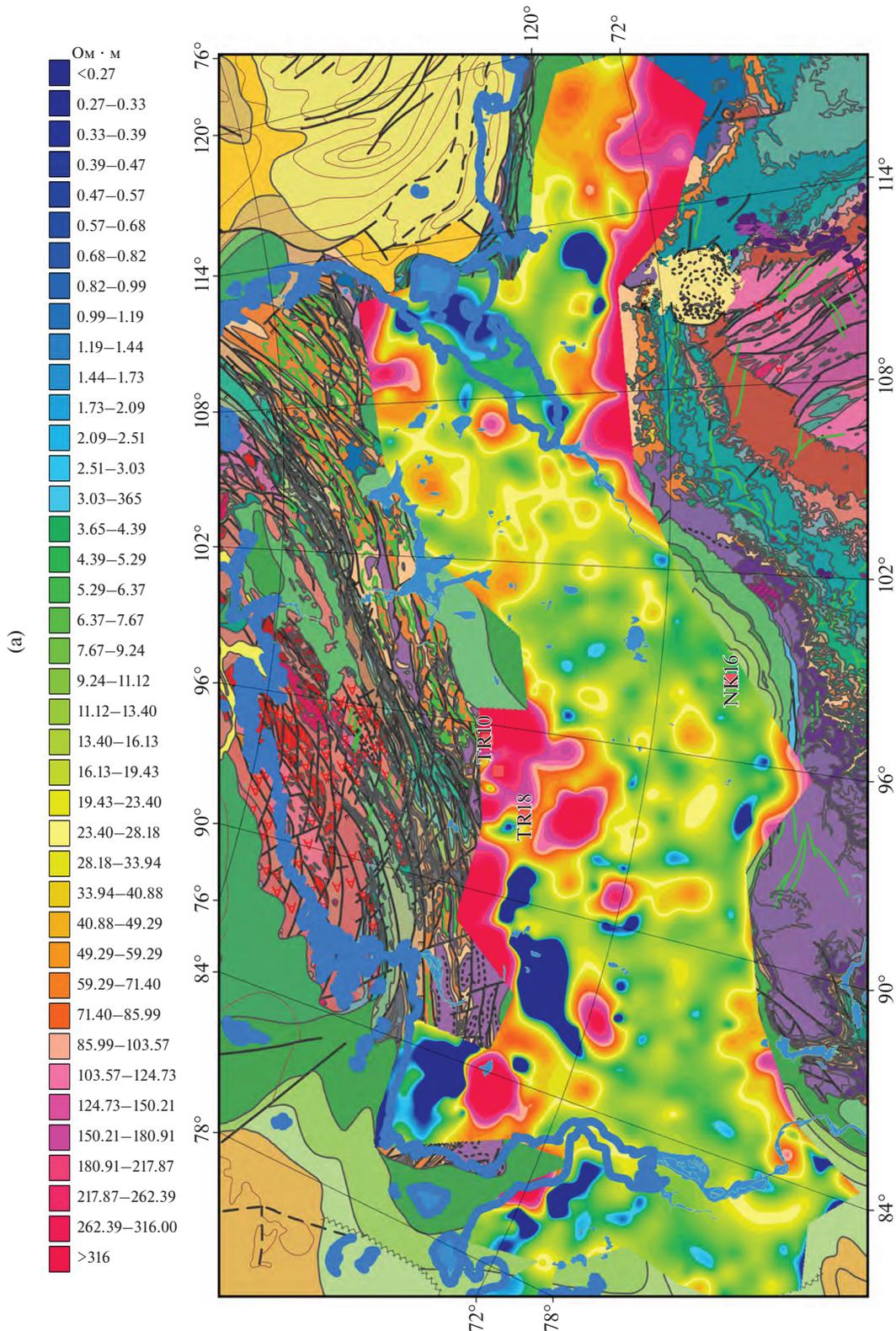


Рис. 4. (Начало). Пространственное распределение по площади ЕХРП эффективного кажущегося сопротивления $\rho_{k-эфф}$ для $T = 10$ с по данным площадного массива оценок МТ импедансов [Слинчук и др., 2021] на фоне геологической карты (а) и рассчитанные по импедансным данным пространственные распределения векторов горизонтального электрического поля $E(x, y, T)$, возбуждаемого однородным гармоническим геомагнитным полем $B_H(T)$ с амплитудой 1 нТл, ориентированным в географических направлениях С–Ю (б) и В–З (в), для периодов 10 с (красный цвет), 100 с (черный) и 1000 с (зеленый); карта усредненной по верхним 10 км удельной электропроводности в модели [Alekseev et al., 2015] (г) и рассчитанные в этой модели амплитудные геоэлектрические отклики на возбуждение однородным гармоническим геомагнитным полем $B_H(T)$ единичной амплитуды для периодов 10 с (д) и 100 с (е) (фрагменты карт, построенных для территории РФ в работе [Kozuyeva et al., 2022]).

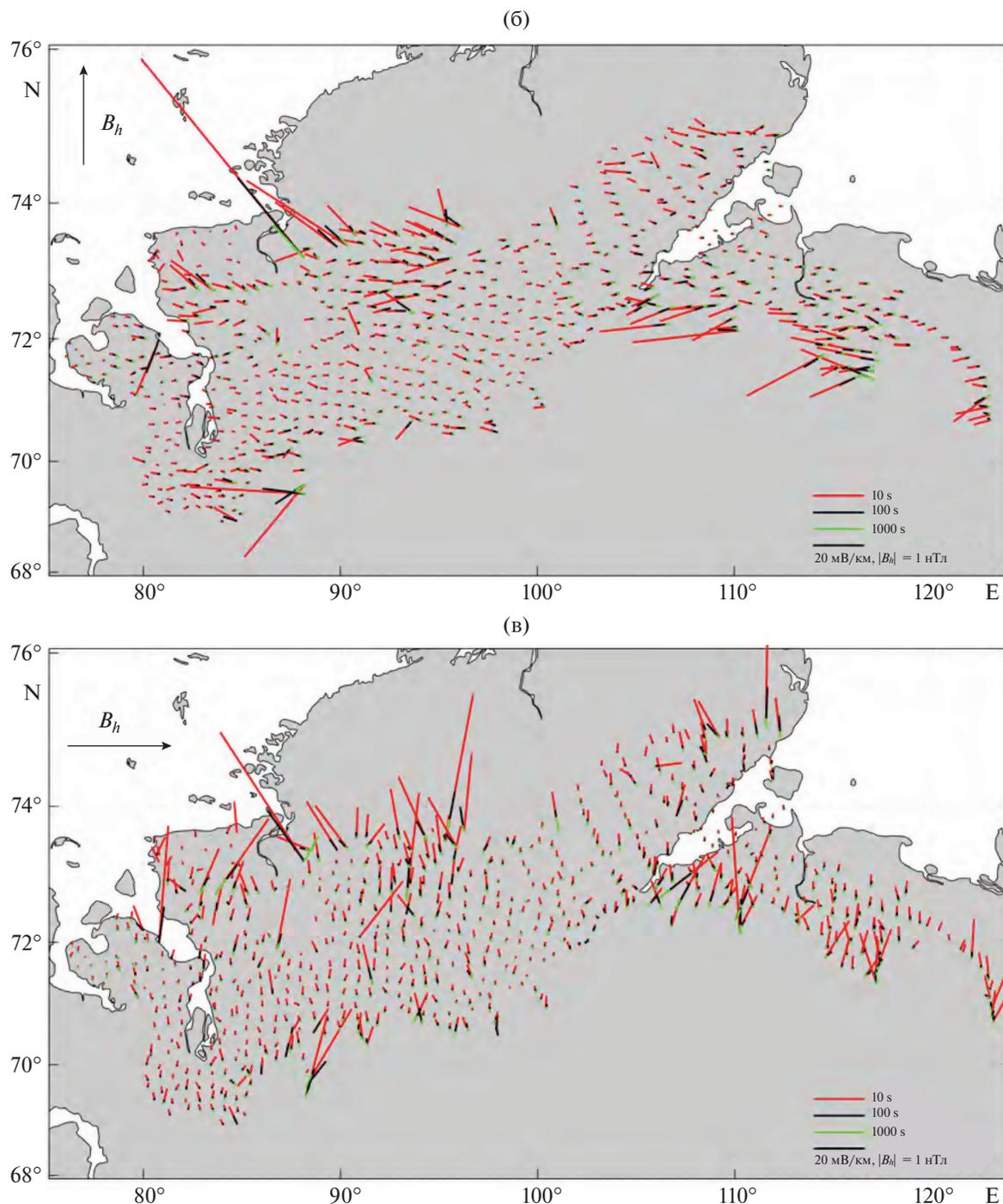


Рис. 4. (Продолжение).

Центрального сектора Российской Арктики, черпались из цифрового архива записей советских/российских арктических магнитных станций [Kozyreva et al., 2022]. Архив содержит трехкомпонентные 1-минутные магнитные записи со станций арктической зоны РФ за период, начиная с 1983 г. и по настоящее время, и доступен на сайте ftp://door.gcras.ru/ftp_anonymous/ARCTICA_Rus/.

Рис. 5 и рис. 6 демонстрируют примеры магнитограмм нескольких событий космической погоды. Для общей характеристики условий в межпланетном пространстве, на тех же рисунках показаны изменения плотности плазмы солнечного ветра N_p , скорости солнечного ветра V и вертикальной составляющей межпланетного магнитного поля B_z (по данным базы данных OMNI <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Все рассматриваемые

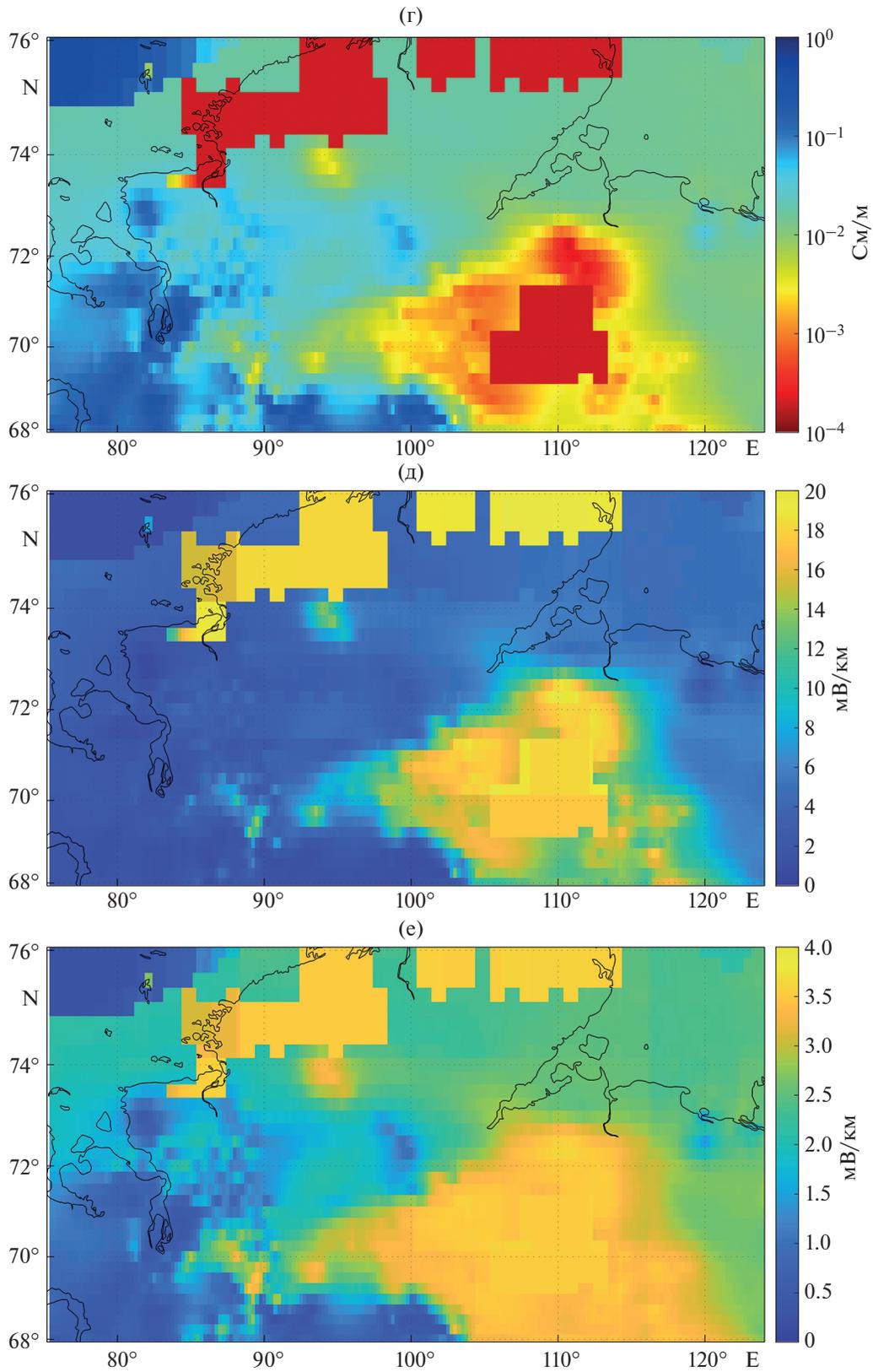


Рис. 4. (Окончание).

мые геомагнитные события связаны с взаимодействием высокоскоростного потока солнечного ветра ($V_{\max} \sim 700\text{--}800$ км/с, $N_p \sim 30\text{--}40$ см⁻³) с магнитосферой Земли, вызывающим небольшие магнитные бури с $|Dst| \sim 50\text{--}60$ нТл. Во время этих бурь в ночном секторе Земли наблюдаются интенсивные суббури (~ 1000 нТл). Продемонстрированные события важны для проблемы возбуждения ГИТ, т.к. включают интервалы с быстрыми вариациями (см. также рис. 7, рис. 9), однако физическая природа последних выяснена не полностью.

Подходы к оценке геоэлектрических полей

Геоэлектрические отклики синтезировались по тензорам МТ импедансов: в частотной области — с использованием гармонических аппроксимаций внешнего магнитного поля, а во временной — по реальным временным записям интенсивных магнитных возмущений.

В рамках первого подхода (частотная область), следуя работе [Bedrosian, Love, 2015], в качестве внешнего возбуждения бралась простейшая модель однородных в пространстве магнитных возмущений в виде плоской гармонической волны с периодом T и единичной амплитудой $B_h(T) = B_h \exp(-i2\pi t/T)$, $B_h = 1$ нТл, осциллирующей в двух направлениях: географические С—Ю или В—З. Расчет с ее использованием векторов горизонтального электрического поля по имеющимся МТ импедансам в базовой зависимости $E(T, x, y) = Z(T, x, y)B_h(T)$ позволяет непосредственно анализировать пространственно-частотные искажения падающей плоской волны эффектами реальных неоднородностей глубинной электропроводности.

Второй подход дает представление о динамике (изменении во временной области) отклика реальной глубинной трехмерной структуры электропроводности на конкретную временную вариацию магнитного поля и позволяет оценивать возможные экстремальные амплитуды геоэлектрического поля на площади исследования. За неимением синхронного массива электромагнитных наблюдений для этого применяется специально разработанная программа синтеза временного ряда электрического поля $E(t, x, y)$ по заданной частотной зависимости МТ импеданса $Z(f, x, y)$ и конкретному временному ряду аномальных вариаций $\Delta B(t, x, y)$. Программа, основанная также на плосковолновой модели внешнего поля, использует среду программного комплекса обработки МТ данных ЕПИ-Кит и устойчивые схемы прямых и обратных преобразований Фурье.

Алгоритм синтеза теллурического поля $E(t)$ по геомагнитному полю $\Delta B(t) = \{H(t), D(t)\}$ (где H — его северная компонента в геомагнитных координатах, а D — восточная), использует фундаментальную магнитотеллурическую зависимость электрических $E(f) = \{E_H(f), E_D(f)\}$ и магнитных $\Delta B(f) = \{H(f), D(f)\}$ полей в частотной области через полный комплексный тензор импеданса $Z(f)$ [Бердичевский, Дмитриев, 2009]:

$$\begin{pmatrix} E_H(f) \\ E_D(f) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{HH} & Z_{HD} \\ Z_{DH} & Z_{DD} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H(f) \\ D(f) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где компоненты тензора импеданса заданы в практических единицах ($\text{мВ} \cdot \text{км}^{-1} \cdot \text{нТл}^{-1}$), и повернуты в геомагнитные координаты.

Преобразование Фурье применяется к перекрывающимся последовательным сегментам (скользящим временным окнам Δt) анализируемой записи геомагнитного поля для получения набора спектральных оценок $\Delta B(f)$ и по формулам (1) — соответствующих оценок теллурического поля $E(f)$. Обратное преобразование Фурье выполняется для каждого временного окна. Таким образом, для момента времени, отвечающего середине каждого из окон, накапливается несколько оценок электрического поля, которые усредняются для стабилизации вычисления итогового временного ряда синтетического электрического поля $E(t)$, отвечающего магнитной записи. Программная реализация алгоритма успешно продемонстрировала свою корректность на синтетических магнитных и электрических временных рядах проекта COMDAT [Ernst et al., 2003].

Синтез теллурических полей в интересующих пунктах (x, y) Енисей-Хатангского прогиба был проведен для ряда ярких событий космической погоды. В качестве входного сигнала $\Delta B(t, x, y)$ брались отрезки записи интенсивных вариаций $\Delta B(t, x_0, y_0)$ в ближайшем к (x, y) пункте (x_0, y_0) стационарных геомагнитных наблюдений (из цифрового архива минутных записей [Kozyreva et al., 2022]).

Обсуждаемые в следующем разделе синтезированные временные геоэлектрические отклики (рис. 7, рис. 9) были получены с 1-мин дискретизацией по рядам геомагнитных наблюдений длительностью 24 и 8 ч (рис. 5, рис. 6а) при использовании скользящего окна 128 отсчетов (для прямого — расчет спектров магнитного поля, а также обратного преобразования Фурье — восстановление рядов теллурического поля по рассчитанным спектрам $E(f)$). В целях проверки устойчивости расчетов проводились эксперименты с несколькими окнами (128\256\512). Для работы с большими окнами импедансные кривые (максимальные периоды 1500—1800 с, рис. 3) были в необходимой мере экстраполированы в область более длинных периодов. Результаты экспериментов продемонстрировали незначительные отличия в

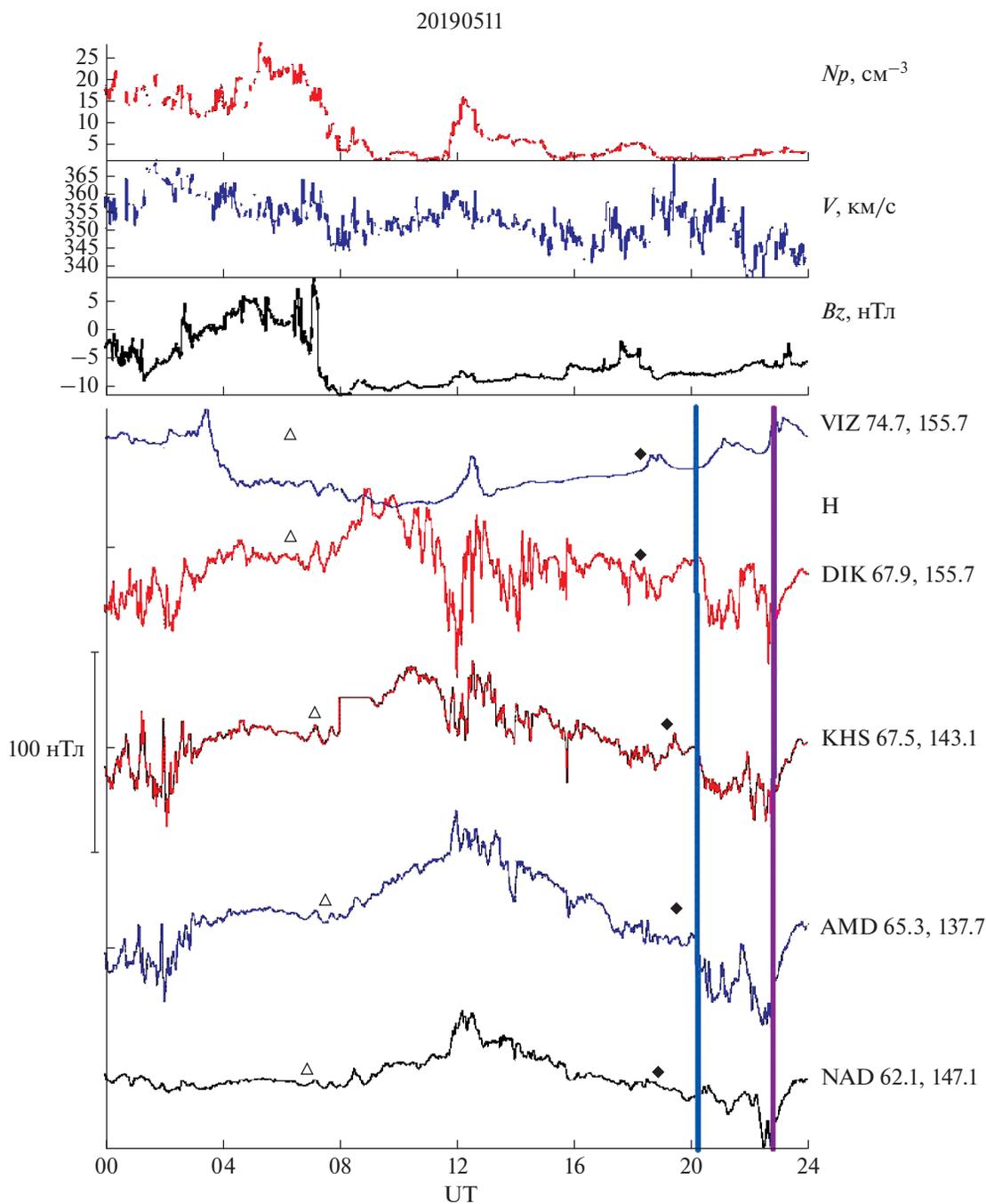


Рис. 5. Вариации H -компоненты магнитного поля (в направление геомагнитного Севера), записанные на станциях VIZ, DIK, KHS, AMD, NAD (по профилю 140° – 150° магнитной долготы, указаны геомагнитные координаты станций в градусах) в интервале 00–24 UT 11.05.2019 г. Три верхних графика: вариации плотности (N_p), скорости (V) солнечного ветра и B_z – компоненты межпланетного магнитного поля. Треугольниками отмечен локальный полдень, а ромбами – полночь. Синяя и розовые вертикальные линии отмечают моменты времени 20:08 UT и 22:43 UT, соответственно, для которых на рис. 2 показаны вектора синтезированных геоэлектрических откликов в NK16, TR18, TR08, TR10.

получаемых временных рядах геоэлектрических откликов.

Исходя из этих соображений, опирающиеся на результаты синтеза геоэлектрических полей

оценки возможных экстремальных амплитуд их вариаций в регионе ЕХРП можно считать достаточно надежными – по крайней мере в диапазоне периодов 120–1000–1250 с, представляющем

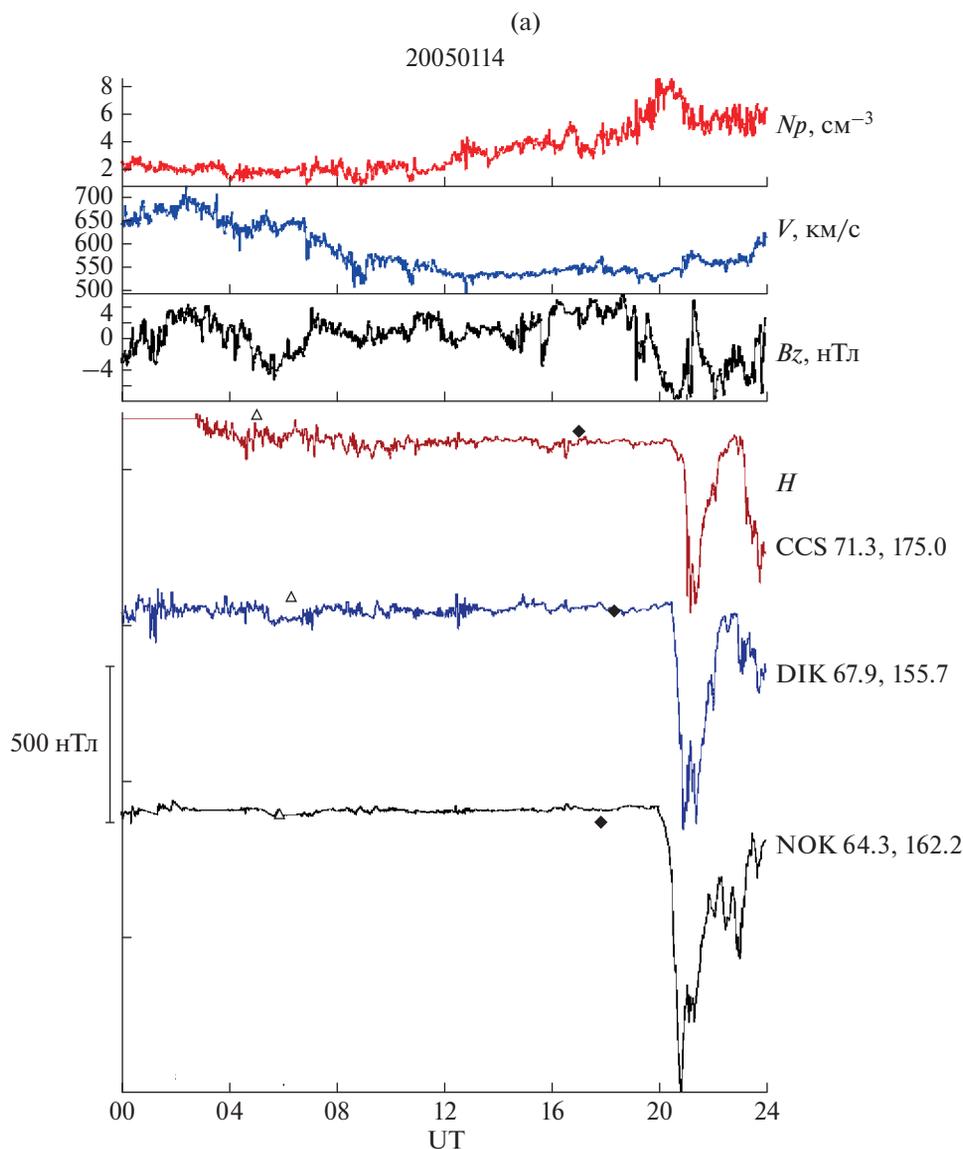


Рис. 6. (Начало). Вариации H -компоненты магнитного поля (в направление геомагнитного Севера), записанные на станциях CCS, DIK и NOK в интервале 00–24 UT 01.14.2005 г. (а) и 00–24 UT 08.02.2005 г. (б). Три верхних графика: вариации плотности (N_p), скорости (V) солнечного ветра и B_z – компоненты межпланетного магнитного поля. Треугольниками отмечен локальный полдень, а ромбами – полночь.

значительный интерес с точки зрения исследования ГИТ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Енисей-Хатангский региональный прогиб, протягивающийся в субширотном направлении более чем на 1000 км, заполнен почти 20-км толщей мезозойских (MZ) хорошо проводящих осадков с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 5\text{--}20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [Афанасенков, Яковлев, 2018] (рис. 2). Его борта граничат с Сибирской платформой (Норильской грядой и Анабарской моноклизой) на юге и с Таймырским орогеном на севере,

которые сложены консолидированными палеозойскими и более древними осадочными и метаморфическими комплексами ($\rho \geq 100\text{--}400 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), частично перекрыты трапповыми толщами, пронизаны еще более высокоомными интрузивными образованиями и разбиты разломами. В пределах ложа прогиба геофизическими методами выявлены многочисленные выступы его основания: Карско-Хатангская и Хатанго-Лаптевская гряды, Янгодо-Горбитский выступ (ЯГВ) и др. Пространственные распределения по территории ЕХРП эффективного кажущегося сопротивления $\rho_{к_эфф}(T) = 0.2Z_{эфф}^2(T)$, $Z_{эфф} = |\det Z|$, отражают эти

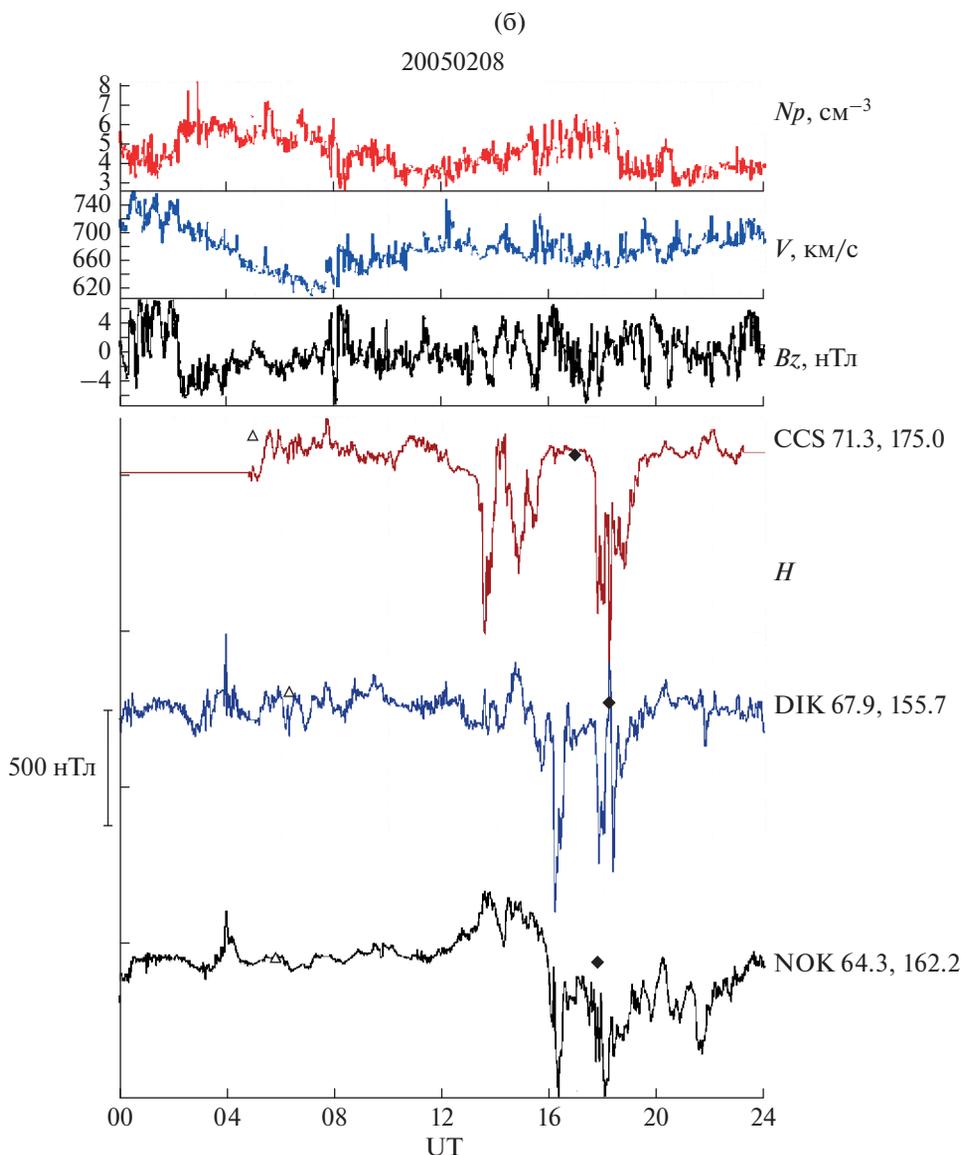


Рис. 6. (Окончание).

геоэлектрические контрасты на соответствующих скин-глубинах. Пример такого распределения дает карта $\rho_{k_эфф}$ для периода $T = 10$ с (рис. 4а), выявляющая неоднородности глубинной электропроводности на уровнях $\sim 3-7$ км в пределах осадочного бассейна и на более глубоких горизонтах ($\sim 7-12$ км) – на бортах.

Векторные карты геомагнитных откликов на гармоническое возбуждение

Расчитанные по импедансным данным векторные поля $E(T, x, y)$ геоэлектрических откликов на возбуждение поляризованной В–З или С–Ю однородной монохроматической волной $B_h(T)$ с единичной амплитудой показаны на рис. 4б, 4в

для $T = 10, 100$ и 1000 с. Представленные периоды оценивания относятся к ультранизкочастотному (УНЧ) диапазону геомагнитных вариаций, в котором, согласно имеющимся наблюдениям и теоретическим оценкам амплитуды ГИТ наиболее велики [Пилипенко, 2021; Kozuyeva et al., 2022].

Благодаря пространственной однородности внешнего возбуждения эти векторные распределения можно назвать картами “геоэлектрической опасности” для будущей инфраструктуры ЕХРП: в соответствии с полученными характеристиками теллурических полей на них выделяются области прогиба, особенности геоэлектрического строения которых позволяют ожидать возникновения наиболее интенсивных ГИТ. В качестве таких областей нужно отметить его борта (контакты

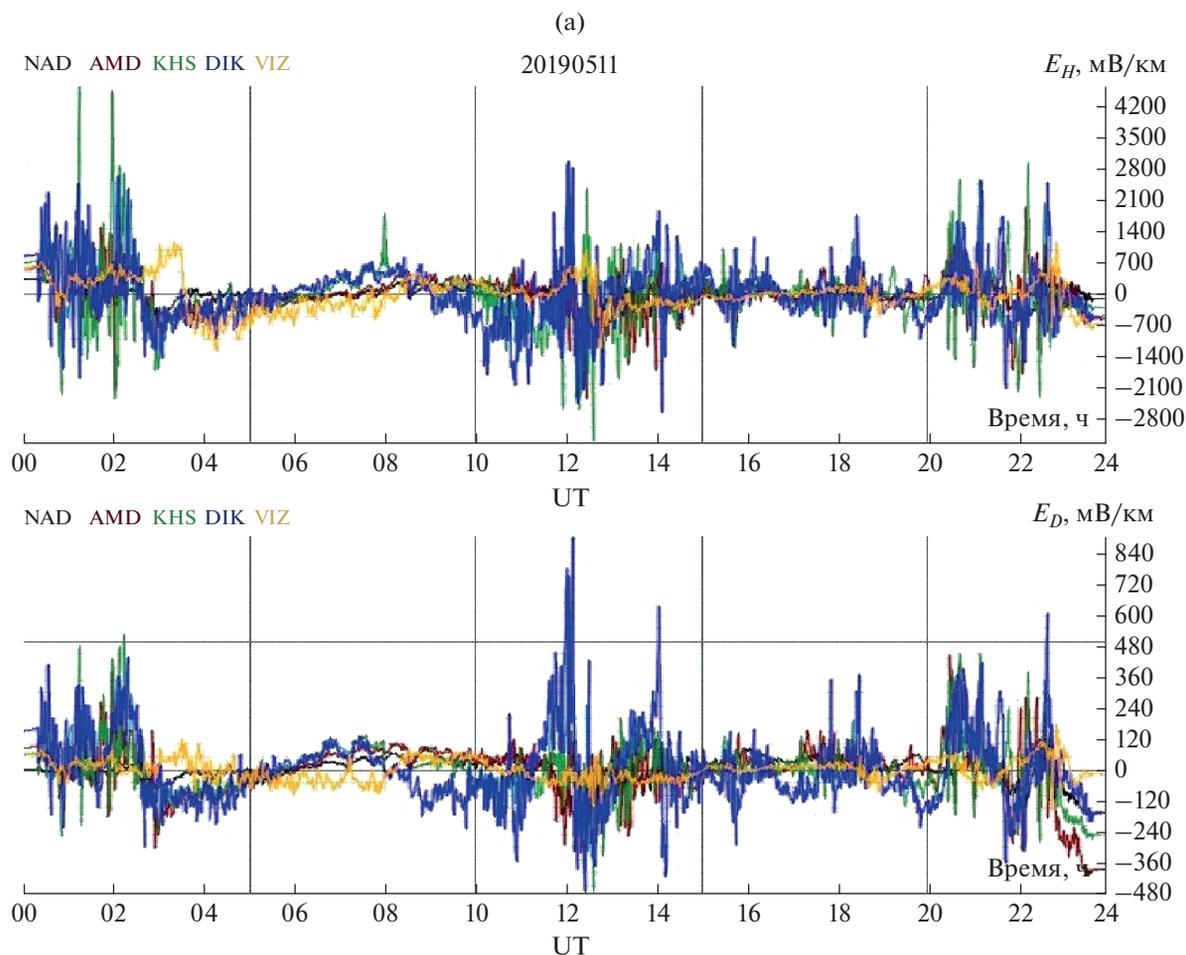


Рис. 7. (Начало). Результаты синтеза временных рядов вариаций E_H , E_D -компонент электрического поля по экспериментальным частотным зависимостям $Z(f)$ в точках зондирования TR10 (а) и NK16 (б) для записи магнитных вариаций в интервале 00–24 UT 11.05.2019 г. (рис. 5) в пунктах магнитных наблюдений NAD, AMD, KHS, DIK, VIZ. На панели (в) представлены производные по времени вариаций компонент H и D (нТл/с). Положение пунктов, частотные зависимости $Z(f)$ и локальная геоэлектрическая обстановка представлены на рис. 2, рис. 3, рис. 4, соответственно.

MZ-осадков с высокоомным *PZ*-основанием), С–3 оконечность Таймыра (структуры с высокими контрастами электропроводности, связанными с присутствием графитосодержащих *PZ*-осадочных слоев), а также область ЯГВ основания прогиба (скрытые под тонким слоев осадков дислоцированные и неоднородные *PZ*-осадочные и магматические образования). Для анализа изменчивости геоэлектрических откликов нами были выбраны пункты МТ зондирования, расположенные в областях существенно различного геоэлектрического строения (рис. 2). Пункт NK16 расположен в области глубокого желоба *MZ* осадков и характеризуется заметной одномерностью и минимальными амплитудами импедансов. Пункты TR18, TR08 и TR10 находятся в пределах ЯГВ с его, в целом, высокоомным разрезом, где однако присутствуют и сильно контрастные зоны, характеризующиеся значительными вариациями ам-

плитуд МТ импедансов и их сильной трехмерностью (рис. 3, рис. 4а). Если для NK16 геоэлектрический отклик на магнитное возмущений единичной амплитуды не превышает 1–2 мВ/км, то для TR10 эти отклики больше в 20 раз (рис. 4б, 4в). По всей площади максимальные амплитуды рассчитанного геомагнитно-индуцированного электрического поля также меняются очень сильно: от единиц мВ/км в ложе прогиба, до 30 и даже 100 мВ/км для его бортов. Наиболее велики амплитуды откликов для периода $T = 10$ с, отвечающего верхней высокоомной коре, что отмечается для обеих ортогональных поляризаций возбуждающего поля. Интересен факт устойчивой ориентации векторов наиболее сильных откликов к западу от ЯГВ: возможно он обусловлен линейной поляризацией теллурического поля вдоль протяженных проводников С–3 Таймыра, связанных с графитизацией.

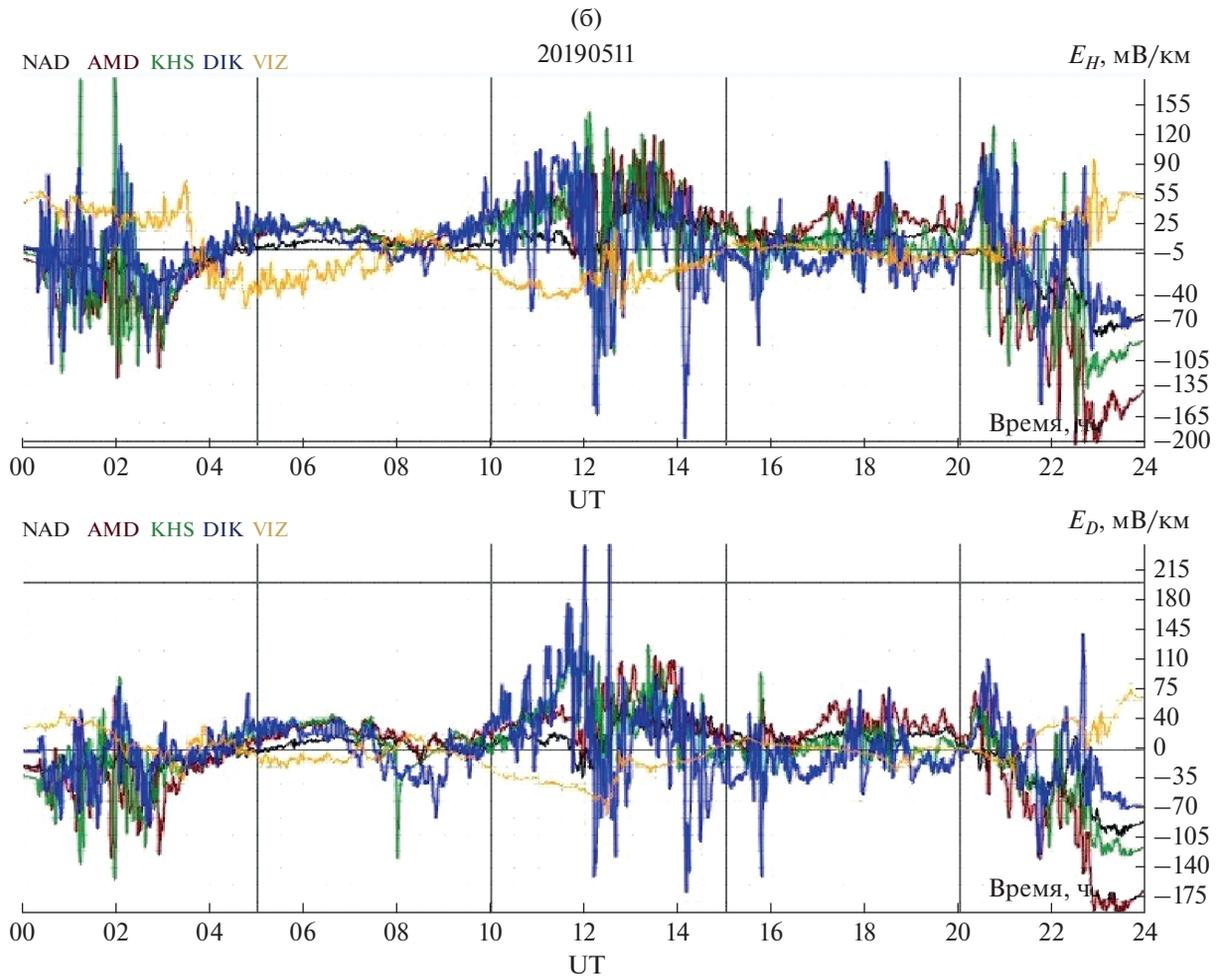


Рис. 7. (Продолжение).

Сравнение амплитуд геоэлектрических полей, синтезированных по региональному массиву экспериментальных импедансов ЕХРП (рис. 4б, 4в), с результатами аналогичных расчетов по модельным скалярным импедансам [Kozyreva et al., 2022] приведено для региона прогиба на рис. 4д, 4е. Оно демонстрирует общее согласие амплитудных уровней откликов и выявляет ожидаемую значительную детализацию картины их изменчивости при использовании материалов реальных плотных МТ наблюдений. На рис. 4г можно видеть фрагмент карты средней удельной электропроводности верхнего 10-км слоя 3D-глобальной модели [Alekseev et al., 2015], которая была построена ранее, без учета детального массива импедансов ЕХРП. Показанные на панелях рис. 4д, 4е отклики были получены по рассчитанным в этой модели скалярным локально-нормальным импедансам. Сопоставление панелей (а) и (г) рис. 4, показывает различия в детальности представлений о структуре электропроводности на площади их перекрытия, которые и определяют воз-

можности более тонкого анализа изменчивости геоэлектрических откликов, рассчитанных по массиву экспериментальных МТ данных.

Результаты синтеза временных рядов геоэлектрических полей для реальных геомагнитных событий

Рис. 5 и рис. 6 демонстрируют три суточные записи вариаций компонент магнитного поля (в геомагнитных координатах) со станций Ямала, Таймыра, о. Визе. Показан типичный пример наблюдаемых в Центральном секторе Арктики магнитных бурь умеренной интенсивности с их суббуревными компонентами в ночном секторе (рис. 5). На рис. 6 представлены более частые явления – развивающиеся, в среднем, один раз в три дня изолированные авроральные суббури.

Синтез геоэлектрических откликов для пунктов TR10, TR18, TR08 и NK16 проводился по суточным записям $\Delta B(t) = \{H(t), D(t)\}$ на станциях VIZ, DIK, AMD, KHS, NAD во время геомагнит-

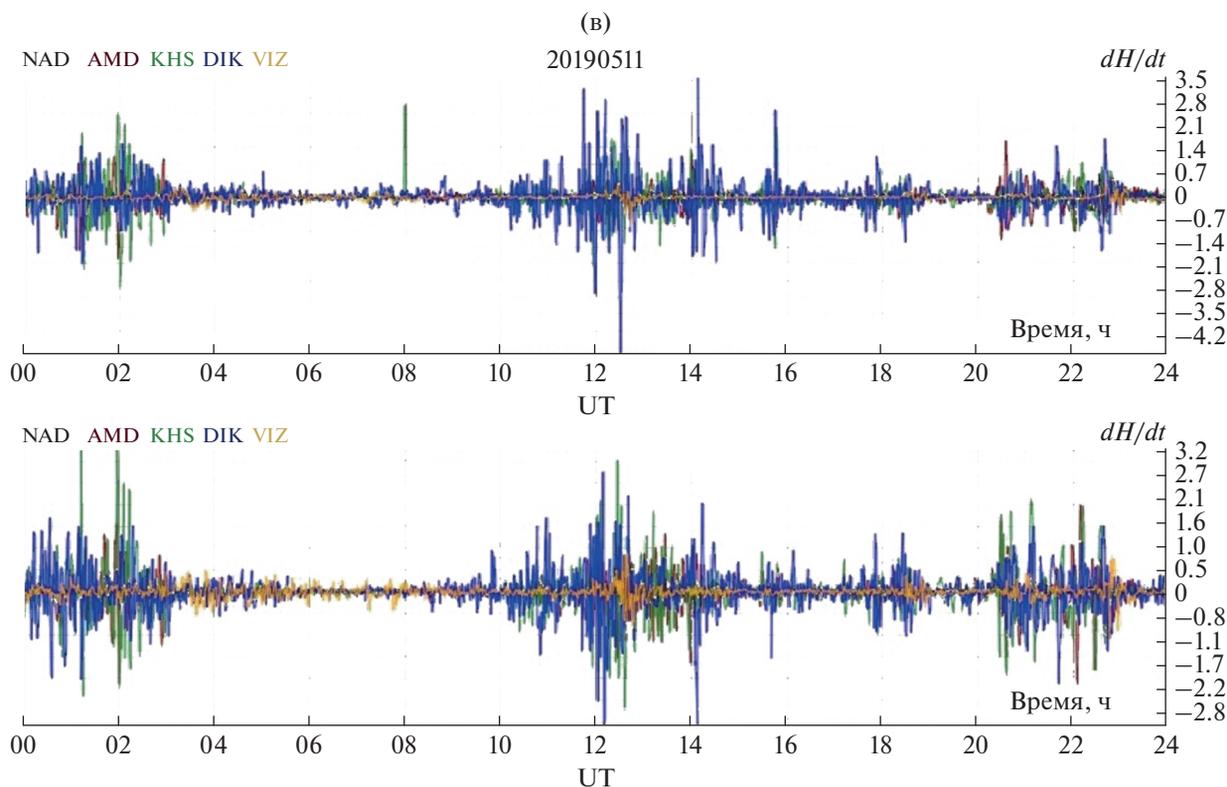


Рис. 7. (Окончание).

ной бури 11.05.2019 г. (рис. 7). Первые три пункта расположены на ЯГВ, характеризующемся неоднородно-высокоомной геоэлектрической структурой, а последний (NK16) – в пределах глубокой осадочной котловины (рис. 2, рис. 4а) прогиба. Соответствующие импедансные тензоры существенно различаются по амплитудам и характеру частотных зависимостей (рис. 3). Для расчетов тензоры Z предварительно переводились в геомагнитные координаты с учетом локальных значений магнитного склонения.

Следует отметить, что аномальные вариации, записанные магнитными станциями в пределах авроральной зоны (DIK, AMD, KHS), коррелированы и достаточно близки по уровням амплитуд и амплитудных спектров, в то время как вариации на станциях вне аврорального овала (VIZ, NAD) отличаются по характеру и имеют заметно более низкие интенсивности (рис. 5 – временные ряды, рис. 8 – спектральные оценки). Как следствие, аналогичные закономерности прослеживаются и в теллурических полях, синтезированных по этим пяти синхронным магнитным записям на разных станциях. Результаты синтеза для пункта TR10 представлены на рис. 7а, для NK16 – на рис. 7б.

Для высокоомного разреза TR10 при синтезе по наиболее изменчивой записи DIK (рис. 7в),

наибольший размах откликов отмечается в E_H и достигает 5 В/км во время увеличения dB/dt около 12 UT. Около 2 часов UT запись в KHS фиксирует локальное осложнение структуры суббури серией нерегулярных возмущений, по-видимому, имеющих крутые фронты с большими и изменчивыми по знаку dB/dt . При интенсивных изменениях D -компоненты размах вариаций поля E_H увеличивается до значений ~ 7 В/км. В то же время, в пункте NK16 геоэлектрические отклики на быстрые изменения магнитных полей, демпфируемые мощной проводящей осадочной толщей, не превышают 0.4 В/км.

На рис. 2 представлены векторы геоиндуцированных электрических полей в четырех рассматриваемых пунктах для двух моментов развития суббури 11.05.2019 г., отмеченных линиями на рис. 5. Этот частный пример иллюстрирует высокую временную и пространственную изменчивость геоэлектрических откликов, определяемую как изменениями условий внешнего возбуждения во времени, так и локальными геоэлектрическими условиями, сильно меняющимися в пространстве даже на довольно малых расстояниях.

Результаты еще одного синтеза временных рядов геомагнитно-индуцированных электрических полей представлены на рис. 9 и рис. 10. Используются те же сильно различающиеся импеданс-

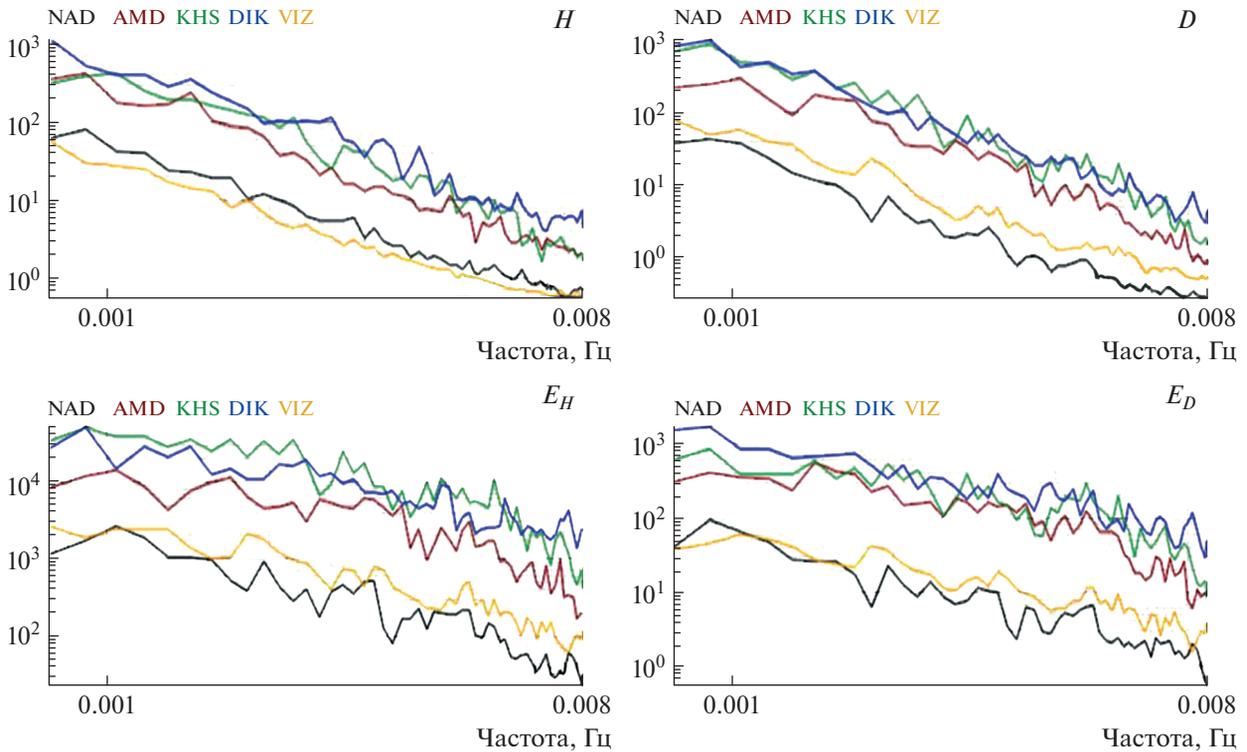


Рис. 8. Частотные зависимости амплитудных спектров магнитных полей ($\text{нТл}/\text{Гц}^{1/2}$), оцененных в окне 128 мин по магнитным записям в п. п. NAD, AMD, KHS, DIK, VIZ во временном интервале 00–24 ч UT 11.05.2005 г., и спектров соответствующих синтезированных электрических полей ($\text{мВт}/\text{км} \cdot \text{Гц}^{1/2}$) для пункта МТ зондирований TR10. Положение пунктов показано на рис. 2, временные ряды – на рис. 5.

ные зависимости в пунктах TR10 и NK16 с привлечением записей магнитных вариаций 14.01.2005 г. (фрагмент с 16 до 24 UT) на наиболее близких к этим пунктам станциях CCS, DIK и NOK (рис. 2). Геомагнитная активность в эти часы была связана с протеканием интенсивной суббури при северном дрейфе аврорального электроджета (рис. 9б). В NOK наблюдается наибольшая амплитуда и наиболее раннее начало бухтообразной вариации. Последняя имеет на всех трех станциях достаточно близкие амплитуды и коррелирована с временным сдвигом. Как и в предыдущем примере, максимальные скорости изменения поля отмечаются в DIK, по-видимому, в моменты прохождения над этой станцией полюсной границы движущегося на север электроджета.

Из рис. 9а видно, что в TR10 (с довольно высоким для ЕХРП разрезом) значительным всплеском dB/dt в моменты $\sim 20:48$, $\sim 20:57$, $\sim 23:00$ UT, отвечают всплески геоэлектрических откликов с размахом по амплитуде до 5 В/км (в E_H) и $2\text{--}3 \text{ В/км}$ (в E_D). Рис. 10а демонстрирует близость уровней спектральных амплитуд геомагнитных полей на трех станциях (с некоторым их уменьшением в CCS) и сохранение подобных соотношений в частотных спектрах синтезированных теллуриче-

ских полей в TR10 (рис. 10б). Рис. 10в показывает амплитудные спектры синтетических полей по данным тех же станций, но для NK16, в котором отклики на эти геомагнитные события значительно слабее.

Пути уточнения полученных оценок

Для расширения частотного диапазона оценок необходимы дополнительные экспериментальные данные. В частности, записи магнитных вариаций с секундной дискретизацией дадут возможность по имеющемуся набору импедансов изучать отклики в области периодов, отвечающих высокоомному верхнекоровому разрезу бортов прогиба и мощному приповерхностному слою вечной мерзлоты. При возбуждении этих объектов источниками высокочастотного сегмента УНЧ спектра геомагнитных событий можно ожидать больших амплитуд теллурического поля и, следовательно, ГИТ.

Как в частотном, так и во временном подходах настоящего исследования геоэлектрические отклики рассчитывались в базовом предположении о пространственной однородности внешних геомагнитных возмущений. Подобное приближение справедливо, когда горизонтальный масштаб

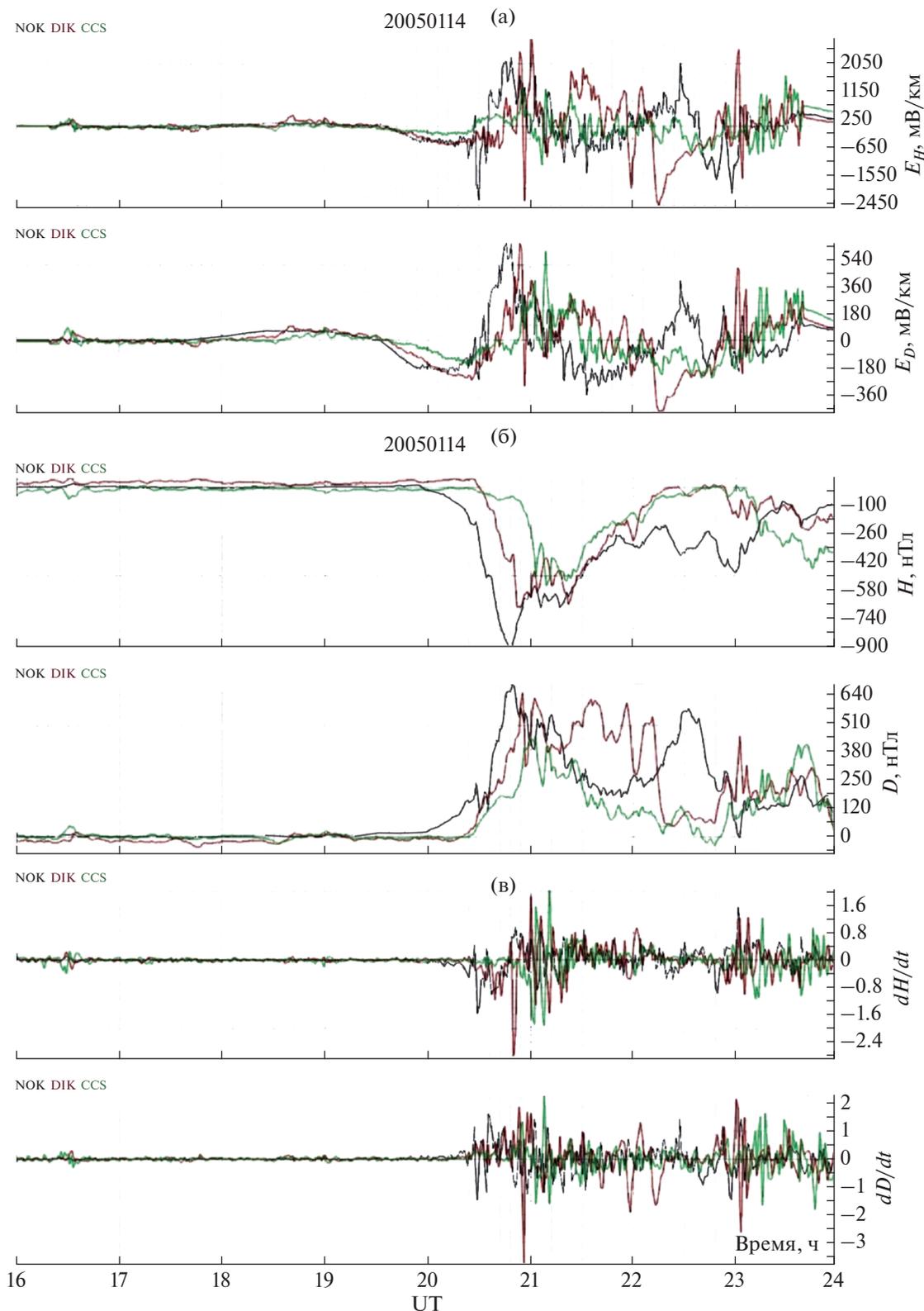


Рис. 9. Результаты синтеза временных рядов вариаций E_H, E_D компонент электрического поля по экспериментальным оценкам $Z(f)$ в пункте зондирования TR10 (а) для записей магнитных вариаций H, D в интервале 16–24 UT 01.01.2005 г. (б) в пунктах NOK, DIK, CCS стационарных магнитных наблюдений. Положение пунктов, амплитудные частотные зависимости компонент $Z(f)$ для TR10 и локальная геоэлектрическая обстановка представлены на рис. 2–рис. 4. Панель (в) демонстрирует производные по времени вариаций H, D (нТл/с).

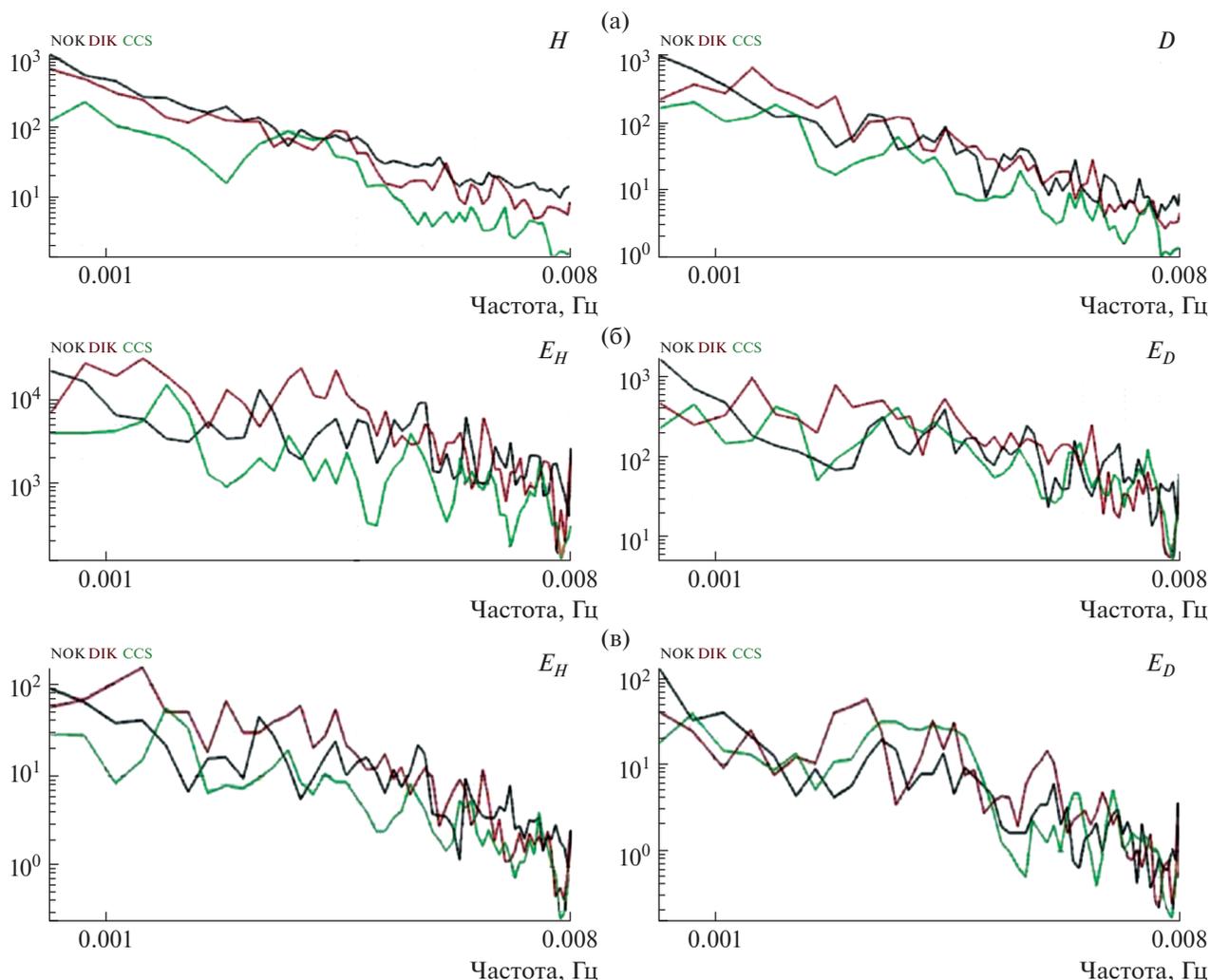


Рис. 10. Частотные зависимости амплитудных спектров магнитных полей ($\text{нТл}/\text{Гц}^{1/2}$), оцененных в окне 128 мин по магнитным записям в п. п. NOK, DIK, CCS для временного интервала 16–24 ч UT 14.01.2005 г. (а), и спектров соответствующих синтезированных электрических полей ($\text{мВт}/\text{км} \cdot \text{Гц}^{1/2}$) для пунктов МТ зондирования TR10 (б) и NK16 (в). Положение пунктов показано на рис. 2, временные ряды магнитных полей в этих пунктах и геоэлектрических полей в п. TR10 – на рис. 9.

возмущения намного превышает скин-глубину электромагнитного поля в проводящей Земле (критерий Вайта–Прайса), и часто нарушается для многих реальных источников при значительных площадях исследования и в условиях высокоомных разрезов. При получении оценок в частотной области, эта аппроксимация была вполне адекватна постановке задачи – построению карт “геоэлектрической опасности”, ранжирующих регион согласно относительным величинам аномальных откликов известных проводящих структур на некое условное однородное внешнее возмущение (плоскую гармоническую волну). При этом полагалось, что современные методы обработки предоставляют истинные оценки МТ импедансов, зависящие от геоэлектрической структуры, а не от конфигурации источника. По-

следнее справедливо при выполнении условия постоянства или линейного изменения в пространстве горизонтальных компонент внешнего магнитного источника [Бердичевский, Дмитриев, 2009]. Эти условия могут быть удовлетворены при использовании рациональных критериев селекции планарных событий и накопления их достаточного количества в процессе обработки МТ наблюдений, выполненных с удаленной базой синхронных записей [Sokolova, Varentsov, 2007; Погребных и др., 2022].

Для получения оценок геоэлектрических откликов во временной области за неимением плотной сети магнитных наблюдений использовались события, записанные магнитными станциями на удалении от пункта МТ зондирования. Такой подход прагматично применяется во многих ис-

следованиях, посвященных ГИТ, например, в [Dimmock et al., 2019] и др. Выше отмечались корреляция геомагнитных возмущений, записанных на станциях авроральной зоны, и определенная близость их амплитуд (рис. 5 – магнитная буря; рис. 6а, 6б – суббури, северный и южный дрейфы авроральных электроджетов, соответственно), а также достаточно плотное группирование их амплитудных спектров, существенно превышающих спектры вариаций на удаленных от этой зоны станциях VIZ и NAD (рис. 8, рис. 10). Эти факты позволяют доверять оценкам, полученным по локальным импедансам и записям на одной из ближайших к ЕХРП станций (НОК или ДИК), как рациональным “прокси” экстремальных геоэлектрических откликов в интересующих характеристических областях прогиба.

Ресурсом для воссоздания более детальной пространственной картины распределения геоэлектрических откликов является оценка по имеющимся полевым МТ наблюдениям на территории ЕХРП горизонтальных магнитных тензоров, связывающих магнитные поля в пунктах локальных зондирований с их синхронными аналогами в пунктах, наиболее приближенных к магнитным станциям. Похожий подход использовался в работе [Campana et al., 2019], а интерполяция данных сети магнитных станций в целях уточнения пространственной модели внешнего возбуждения – в работах [Dimmock et al., 2019; Bedrosian, Love, 2015]. Трудоемкая работа по построению системы горизонтальных тензоров магнитного поля для территории ЕХРП частично выполнена в рамках производственных работ ООО “Северо-Запад” на участке Ю-В окончания прогиба [Погребных и др., 2022]. Ее результаты показали, что изменения магнитного поля УНЧ диапазона могут превышать 5–7% по модулю и 3° по фазе уже на расстояниях более 10 км.

Угрозы региональной инфраструктуре ЕХРП при возмущениях космической погоды

В регионе ЕХРП с 1969 г. по сегодняшний день эксплуатируется единственный инфраструктурный объект – газопровод Мессояха–Норильск. Этот первый в мире газопровод за Полярным кругом связывает Мессояхское газоконденсатное месторождение и Норильский горно-металлургический комбинат, проходя под Енисеем и пересекая 86 рек, 15 крупных озер и болот (рис. 2). На большей части своего 263-км протяжения он стоит на стальных опорах, имеет современное антикоррозийное покрытие и катодную защиту. В условиях болотистых тундр, сплошной и островной распространенности вечной мерзлоты, даже малейшее нарушение покрытия ведет к быстрому разрастанию дефекта и интенсивной электрохимической коррозии. Кумулятивный

эффект периодически возникающих превышений уровня катодной защиты при вариациях потенциала труба-почва во время геомагнитных возмущений и протекания ГИТ ведет к значительному ускорению коррозии. Так, длительная активность квазипериодических геомагнитных пульсаций может быть даже более опасной, чем кратковременные всплески ГИТ во время взрывного начала суббури. Пики на характерных для РіЗ пульсаций периодах (3, 4, 10 мин) можно выделить в особенностях спектров рассмотренных авроральных суббурь (рис. 8, рис. 10). Близкая к субширотной, региональная поляризация МТ поля в УНЧ диапазоне, определяемая простиранием проводящей осадочной толщи прогиба [Слинчук и др., 2022], усиливает индуцированные токи в заземленных металлических конструкциях газопровода, также протягивающегося в субширотном направлении.

Оценки ГИТ для их учета при проектировании и оптимизации мер защиты от деструктивных эффектов космической погоды можно получить по геоэлектрическим откликам на типичные геомагнитные возмущения и техническим параметрам объекта инфраструктуры. В случае газопровода Мессояха–Норильск в этих целях следует провести обстоятельный анализ магнитных записей станции НОК для выявления статистик фиксируемых аномальных геомагнитных возмущений, а также – привлечь данные уже имеющихся и, желательно, дополнительных постановок МТЗ в окрестности газопровода. Аналогичные априорные оценки можно получать и для “виртуальных” линий будущих инфраструктурных объектов ЕХРП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование заложило базу для необходимых работ по прогнозированию рисков, связанных с воздействием аномалий космической погоды на существующие и будущие технологические объекты Енисей-Хатангской НГО – обширной и перспективной нефтегазовой области Центрального сектора Российской Арктики. Показано, что для их адекватной оценки необходим тщательный анализ геоэлектрического строения участка/региона работ, так как неоднородности в распределении электропроводности земной коры могут существенно влиять на характер ГИТ, демпфируя или, наоборот, многократно усиливая их амплитуды и модулируя спектральный состав.

В результате сопоставления построенных карт распределения компонент синтезированных теллурических полей с геологическими данными выявлены геолого-структурные области изучаемого региона, характеризующиеся наиболее интенсивными геоэлектрическими откликами. Оценки

векторов горизонтального геоэлектрического поля E , индуцированного гармоническими колебаниями $B_h(T)$, сильно варьируют по величине и направлению. На частотах, несущих большую часть энергии возмущенного поля, они имеют максимальные амплитуды в диапазоне от <1 до $\sim 50\text{--}100$ мВ/км при единичной амплитуде внешних магнитных вариаций. Наиболее велики геоэлектрические отклики обнажающихся в бортах прогиба или близки к поверхности (Янгодо-Горбитский выступ) палеозойских высокоомных образований. Благодаря выявленному углеводородному потенциалу [Афанасенков и др., 2018], последние все более привлекают интерес нефтяников. Возможно, что развитие инфраструктуры в области их распространения может потребоваться уже в недалеком будущем. Даже при умеренных амплитудах геомагнитных вариаций во время суббурь (300–500 нТл) их геоэлектрические отклики в подобных условиях могут достигнуть величины более 15 В/км, что будет серьезной угрозой катодной защите будущих газопроводов. Показано, что во время умеренной магнитной бури 11.05.2019 г. с $Dst \sim -60$ нТл и суббури 14.01.2005 для ряда геоэлектрических структур ЕХРП (в частности, на ЯГВ складчатого основания прогиба) вариации теллурического поля, превышали 5–7 В/км.

При проектировании региональной инфраструктуры (трубопроводов, будущих ЛЭП) полученные оценки возможных амплитуд и направлений геоэлектрического поля, дополненные сведениями о геометрии и электрических параметрах проектируемых объектов, могут быть использованы в расчетах величин наводимых экстремальных ГИТ для оптимизации вариантов систем защиты (катодной защиты трубопроводов, контролирующих систем электроники и др.) от возможных деструктивных эффектов сильных геомагнитных возмущений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарны всем участникам полевых работ в регионе Енисей-Хатангского регионального прогиба, а также исследователям, сформировавшим архив магнитных наблюдений в Российской Арктике, и двум анонимным рецензентам.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работы проводились в рамках госзаданий ИФЗ РАН (Соколова Е.Ю., Козырева О.В., Пилипенко В.А.) и ВНИГНИ (Соколова Е.Ю., Куприянов И.С.), а также были поддержаны проектом 314670 Академии Наук Финляндии (Маршалко Е.Е.) и ООО “Северо-Запад” (Епишкин Д.В., Слинчук Г.Е., Яковлев Д.В., Яковлев А.Г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреев В.С., Бисеркин И.А., Большаков Е.М., Довыденко Г.М., Пиманова Н.Н., Соколова Е.Ю., Спиридонов В.А., Шнектров А.Л. О морфоструктурных и вещественных характеристиках магматических образований Енисей-Хатангского прогиба // Геология нефти и газа. 2021. № 6. С. 83–104.
<https://doi.org/10.31087/0016-7894-2020-6-83-105>
- Афанасенков А.П. и др. Методология комплексного геолого-геофизического изучения малоизученных нефтегазоперспективных территорий РФ на примере северного обрамления Сибирской платформы. ВНИГНИ – 65. Люди, результаты и перспективы / Варламов А.И., Петерсилье В.И. (ред.) М.: ФГБУ “ВНИГНИ”. 2018. С. 150–210.
- Афанасенков А.П., Яковлев Д.В. Применение электро-разведки при изучении нефтегазоносности северного обрамления Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2018. № 7. С. 1032–1052
- Белуховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь и суббурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. 2018. № 1. С. 173–185.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И. Модели и методы магнитотеллурики. М.: Научный Мир. 2009. 570 с.
- Вахнина В.В. Моделирование режимов работы силовых трансформаторов систем электроснабжения при геомагнитных бурях. Тольятти: изд-во ТГУ. 2012. 103 с.
- Гвишиани А. Д., Лукьянова Р. Ю. Геоинформатика и наблюдения магнитного поля Земли: Российский сегмент // Физика Земли. 2015. № 2. С. 3–20.
- Епишкин Д.В. Развитие методов обработки данных магнитотеллурического зондирования // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2016. № 4. С. 40–46.
- Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Магнитные бури и инфаркты: Всегда ли бури опасны // Геофизические процессы и биосфера. 2008. Т. 7. № 3. С. 5–24.
- Пилипенко В.А. Воздействие космической погоды на наземные технологические системы // Солнечно-земная физика. 2021. Т. 7. № 3. 72–110.
<https://doi.org/10.12737/szf-73202106>
- Погребных Е.О., Яковлев Д.В., Епишкин Д.В., Яковлев А.Г. К вопросу о правомерности использования модели плоской волны и двухканальных измерительных систем при выполнении МТЗ в полярных широтах // Физика Земли. 2022. № 5. С. 128–138.
- Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А. Геомагнитные пульсации $Pc5/Pi3$ и геоиндуцированные токи // Изв. РАН. Сер. Физическая. 2021. Т. 85. № 3. С. 445–450.
<https://doi.org/10.31857/s0367676521030236>
- Слинчук Г.Е., Яковлев Д.В., Яковлев А.Г., Андреев М.А., Широкова Е.П. Глубинная трехмерная геоэлектрическая модель Таймыра // Физика Земли. 2022. № 5. С. 60–75.
- Соколова Е.Ю., Козырева О.В., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Епишкин Д.В. Вариации геомагнитных и теллурических полей в северо-западных регионах России при возмущениях космической погоды: связь с геоэлектрической структурой и индуцированными тока-

- ми в ЛЭП // Геофизические процессы и биосфера. 2019. №18. Вып. 4: С. 66–85.
<https://doi.org/10.21455/GPB2019.4-7>
- Alekseev D., Kuvshinov A., Palshin N.* Compilation of 3D-global conductivity model of the Earth for space weather applications // *Earth, Planets and Space*. 2015. V. 67. P. 108.
<https://doi.org/10.1186/s40623-015-0272-5>
- 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. V. 47(6). P. e2019GL086677.
<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. V. 42.
<https://doi.org/10.1002/2015GL066636>
- Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H.* The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface // *Adv. Space Res.* 1998. V. 22(1). P. 17–27.
- Brasse H., Junge A.* The influence of geomagnetic variations on pipelines and an application for large-scale magnetotelluric depth sounding // *J. Geophys.* 1984. V. 55. P. 31–36.
- Campanyà J., Gallagher P.T., Blake S.P., Gibbs M., Jackson D., Beggan C. D. et al.* Modeling geoelectric fields in Ireland and the UK for space weather applications // *Space Weather*. 2019. V. 17. P. 216–237.
<https://doi.org/10.1029/2018SW001999>
- Campbell W.H.* Induction of auroral zone electric currents within Alaska pipeline // *Pure and Applied Geophysics*. 1978. V. 116. P. 1143–1173.
- Cannon P., Barclay L., Curry C., Dyer C., Edwards R., Greene G., Hapgood M., Horne R.B., Jackson D., Mitchell C.N., Owen J., Richards A., Rogers C., Ryden K., Saunders S., Sweeting M., Tanner R., Thomson A., Underwood C.* Extreme space weather: Impacts on engineered systems and infrastructure. London: Roy. Acad. Eng. UK. 2013. P. 1–68.
- Chinkin V.E., Soloviev A.A., Pilipenko V.A., Engebretson M.J., Sakharov Ya.A.* Determination of vortex current structure in the high-latitude ionosphere with associated GIC bursts from ground magnetic data // *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2021. V. 212. P. 105514.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105514>
- Cordell D., Unsworth M.J., Lee B., Haneson C., Milling D.K., Mann I. R.* Estimating the geoelectric field and electric power transmission line voltage during a geomagnetic storm in Alberta, Canada using measured magnetotelluric impedance data: The influence of three-dimensional electrical structures in the lithosphere // *Space Weather*. 2021. V. 19. P. e2021SW002803.
<https://doi.org/10.1029/2021SW002803>
- Dimmock A.P., Rosenqvist L., Hall J.-O., Viljanen A., Yordanova E., Honkonen I., Sjöberg E.C.* The GIC and geomagnetic response over Fennoscandia to the 7–8 September 2017 geomagnetic storm // *Space Weather*. 2019. V. 17. P. 989–1010.
<https://doi.org/10.1029/2018SW002132>
- Dimmock A.P., Rosenqvist L., Welling D.T., Viljanen A., Honkonen I., Boynton R.J., Yordanova E.* On the regional variability of dB/dt and its significance to GIC // *Space Weather*. 2020. V. 18. P. e2020SW002497
<https://doi.org/10.1029/2020SW002497>
- Ernst T., Sokolova E.Yu., Varentsov I.V., Golubev N.G.* Comparison of two MT data processing techniques using synthetic data sets // *Acta Geophys. Pol.* 2001. V. 49. № 2. P. 213–243.
- Ivannikova E., Kruglyakov M., Kuvshinov A., Rastatter L., Pulkkinen A.* Regional 3-D modeling of ground electromagnetic field due to realistic geomagnetic disturbances // *Space Weather*. 2018. V. 16 (5). P. 476–500.
<https://doi.org/10.1002/2017SW001793>
- Kelbert A., Meqbel N., Egbert G.D., Tandon K.* ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // *Computers & Geosciences* 2014. V. 66. P. 40–53.
- Kelbert A.* The role of global/regional earth conductivity models in natural geomagnetic hazard mitigation // *Surveys in Geophysics*. 2020. V. 41. P. 115–166.
<https://doi.org/10.1007/s10712-019-09579-z>
- Kozyreva O., Pilipenko V., Sokolova E., Epishkin D.* Geomagnetic and telluric field variability as a driver of geomagnetically induced currents. Springer Proc. in Earth and Environmental Sciences “Problems of Geocosmos-2018”. Springer Nature Switzerland. 2019. P. 297–307.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-21788-4_26
- Kozyreva O., Pilipenko V., Krasnoperov R., Baddeley L., Sakharov Ya., Dobrovolsky M.* Fine structure of substorm and geomagnetically induced currents // *Annals of Geophysics*. 2020. V. 63(2). P. GM219.
<https://doi.org/10.4401/ag-8198>
- Kozyreva O.V., Pilipenko V.A., Marshalko E.E., Sokolova E.Y., Dobrovolsky M.N.* Monitoring of Geomagnetic and Telluric Field Disturbances in the Russian Arctic // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. P. 3755.
<https://doi.org/10.3390/app12083755>
- Love J.J. et al.* Geoelectric hazard maps for the continental United States // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43. P. 9415–9424.
<https://doi.org/10.1002/2016GL070469>
- Lucas G.M., Love J.J., Kelbert A.* Calculation of voltages in electric power transmission lines during historic geomagnetic storms: An investigation using realistic earth impedances // *Space Weather*. 2018. V. 16. P. 185–195.
<https://doi.org/10.1002/2017SW001779>
- Marshalko E., Kruglyakov M., Kuvshinov A., Juusola L., Kwagala N.K., Sokolova E., Pilipenko V.* Comparing three approaches to the inducing source setting for the ground electromagnetic modeling due to space weather events // *Space Weather*. 2021. V. 19. P. e2020SW002657.
<https://doi.org/10.1029/2020SW002657>
- Morales de J.F., Paulina I., Alves L.R., Denardini C.M.* Evaluation of possible corrosion enhancement due to telluric currents: case study of Bolivia-Brazil pipeline // *Ann. Geophys.* 2020. V. 38. P. 881–888.
- Osella A., Favetto A., Lopez E.* Corrosion effects on buried pipelines due to geomagnetic storms // *J. Appl. Geophys.* 1998. V. 3. № 8. P. 219–233.
- Pilipenko V., Vellante M., Anisimov S., De Lauretis M., Fedorov E., Villante U.* Multi-component ground-based observation of ULF waves: goals and methods // *Annali di Geofisica*. 1998. V. 41. № 1. P. 63–77.
- Pirjola R., Kauristie K., Lappalainen H., Viljanen A., Pulkkinen A.* Space weather risk // *Space Weather*. 2005. V. 3. P. S02A02.

Pulkkinen A., Pirjola R., Boteler D., Viljanen A., Yegorov I. Modelling of space weather effects on pipelines // *J. Appl. Geophys.* 2001. V. 48. P. 233–256.
[https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00109-4](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00109-4)

Pulkkinen A., Bernabeu E., Thomson A., Viljanen A., Pirjola R., Boteler D., Eichner J., Cilliers P.J., Welling D., Savani N.P., Weigel R.S., Love J., Balch Ch., Ngwira C.M., Crowley G., Schultz A., Kataoka R., Anderson B., Fugate D., Simpson J.J., MacAlester M. Geomagnetically induced currents: Science, engineering and applications readiness // *Space Weather.* 2017. *Space Weather.* 2017. V. 15. № 7. P. 828–856.
<https://doi.org/10.1002/2016SW001501>

Püthe C., Kuvshinov A. Towards quantitative assessment of the hazard from space weather: Global 3D-modellings of the electric field induced by a realistic geomagnetic storm // *Earth, Planets and Space.* 2013. V. 65. P. 1017–1025.

Sokolova E. Yu., Varentsov Iv.M., Bear W.G. Deep array electromagnetic sounding on the Baltic Shield: external excitation model and implications for upper mantle conductivity studies // *Tectonophysics.* 2007. V. 445. P. 3–25.

Trichtchenko L., Boteler D. H. Modelling of geomagnetic induction in pipelines // *Ann. Geophys.* 2002. V. 20. P. 1063–1072.
<https://doi.org/10.5194/angeo-20-1063-2002>

Study of Geoelectrical Responses to Space Weather Anomalies: Auroral Latitudes, Yenisei-Khatanga Regional Trough

**E. Yu. Sokolova^{a, b, *}, E. E. Marshalko^c, O. V. Kozyreva^a, I. S. Kupriyanov^b, D. V. Epishkin^d,
V. A. Pilipenko^a, G. E. Slinchuk^{d, e}, D. V. Yakovlev^d, and A. G. Yakovlev^{d, e}**

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*All-Russian Research Institute of Oil Geology, Moscow, Russia*

^c*Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland*

^d*Nord West Ltd., Moscow, Russia*

^e*Moscow State University, Moscow, Russia*

**e-mail: sokol_l@mail.ru*

The paper presents the results of analysis of the geoelectric (telluric) field variability during the Earth's magnetic field disturbances, caused by extreme space weather events. The area of the study is the territory of the Yenisei-Khatanga Regional Trough (YKRT) situated in the auroral zone, where geomagnetic disturbances are characterized by a high level of intensity. The economic development of the YKRT as a large oil and gas-bearing area in the Russian Arctic increases the relevance of the study of possible negative impacts of space weather on future infrastructure facilities. The most serious threat to conductive industrial structures in the polar region will be posed by geomagnetically induced currents (GIC) driven by geoelectrical responses to rapid geomagnetic field changes. The analysis of the variability of telluric fields and calculations of their extreme values in the YKRT area were made using a unique magnetotelluric impedance tensor database collected by Nord West Ltd as a result of the regional phase of the geophysical study of the trough and adjacent areas. The geoelectric field spatial-frequency distributions on the Earth's surface were calculated on the basis of the impedance estimates and harmonic approximations of the external geomagnetic excitation. The obtained maps were correlated with geological data to find areas characterized by maximal distortions of the telluric field. Extreme amplitudes of geoelectrical responses at a series of representative locations in the YKRT were evaluated on the time series of telluric field variations, synthesized through the impedance dependences on frequency and magnetic field time series recorded during geomagnetic storms and substorms at the nearest stationary monitoring sites. The resulting estimates of amplitudes and directions of geoelectric fields during space weather disturbances can be used to account for possible destructive effects of GIC in design of pipelines, power transmission lines and railways.

Keywords: telluric fields, geoelectrical crustal heterogeneities, geomagnetically induced currents (GIC), space weather, auroral zone, Yenisei-Khatanga Regional Trough