

УДК 550.370

ОТРАЖЕНИЕ КРУПНЫХ ДЛЯ БАЙКАЛЬСКОГО РИФТА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 2020–2021 гг. В ДАННЫХ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2022 г. И. К. Семинский^{1, 2, *}, А. В. Поспеев^{1, **}

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²ООО «СИГМА-ГЕО», г. Иркутск, Россия

*E-mail: iks@crust.irk.ru

**E-mail: avp@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 30.10.2021 г.

После доработки 14.02.2022 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

В статье рассмотрены результаты мониторинга компонент естественного электромагнитного поля Земли, полученные в период 2020–2021 гг., а также их связь с относительно крупными сейсмическими событиями в пределах Байкальской рифтовой зоны (в особенности – Кударинским землетрясением 09.12.2020 г., $M_w = 5.5$). В ходе режимных наблюдений магнитотеллурического поля более чем за месяц до сейсмического события отмечено увеличение проводимости тензорочувствительных частей зондируемого пространства, ассоциируемое с вытеснением в процессе подготовки землетрясения проводящего флюида в тектонически ослабленные зоны земной коры. За сутки до сейсмического события отмечается аномальное поведение вертикальной компоненты электрического поля (E_z), проявляющееся в виде U -образных колебаний с периодом 5–30 с, ассоциирующееся с формированием и релаксацией электрических зарядов, возникающих при сжатии кварцсодержащих пород. В первом приближении установлено, что анализ данных магнитотеллурического мониторинга имеет потенциал выделения среднесрочных и краткосрочных предвестников сейсмических событий.

Ключевые слова: землетрясение, Кударинское землетрясение, Быстринское землетрясение, электропроводность, коровый проводящий слой, магнитотеллурическое зондирование, мониторинг, Байкальская рифтовая зона.

DOI: 10.31857/S0002333722040093

ВВЕДЕНИЕ

Внутриконтинентальная Байкальская рифтовая зона (БРЗ) занимает территорию около 2500 км² и простирается от северо-западной Монголии до крайнего востока Сибири. Несмотря на дискуссионность геологической природы формирования рифта (активной – вследствие зарождения и роста т. н. “астеносферного диапира” [Логачев, 2003; Крылов и др., 1981], либо пассивной – как результат Индо-Азиатской коллизии [Molnar, Tarronnieg, 1975]), общепризнанным является повышенный разогрев литосферы БРЗ. Важно отметить, что рифтогенные процессы происходят и в наше время, проявляясь ростом рифтовых впадин и поднятий, активным разломообразованием и повышенной сейсмичностью.

Гипоцентры землетрясений, происходящих в пределах БРЗ, обычно локализуются на глубинах от 15 до 20 км, что в несколько раз выше положения гипоцентров землетрясений, приуроченных

к краевым частям континентов. Сейсмические события с магнитудой более 5.5 происходят в пределах высокосейсмичной части БРЗ примерно один раз в 5–10 лет. В силу того, что к ней примыкает развитый экономический кластер, включающий города Иркутск, Улан-Удэ, Ангарск, Шелехов, Усолье-Сибирское, Свирск, Байкальск и др. с населением более двух млн чел., каждое сильное землетрясение вызывает широкий общественный резонанс.

Одним из наиболее крупных сейсмических событий является Цаганское землетрясение, произошедшее в дельте реки Селенги 12.01.1862 г. В результате катаклизма интенсивностью в эпицентре не менее 10 баллов, под воды оз. Байкал ушел участок суши площадью около 230 км², ныне – залив Провал. Периодичность землетрясений подобного уровня в Байкальском рифте составляет около 200 лет [Мельникова и др., 2014], что усиливает актуальность исследования меха-

низмов, а главное прогноза сейсмических событий для рассматриваемой территории.

Очередными ощутимыми для населения Иркутской области и Бурятии стали последовавшие друг за другом с небольшой периодичностью Быстринское (21.09.2020 г., $M_w = 5.4$, эпицентр на расстоянии в 21 километр к северо-западу от п. Култук), Кударинское (09.12.2020 г., $M_w = 5.5$, эпицентр в районе залива Провал) и Хубсугульское (12.01.2021 г., $M_w = 7.1$, эпицентр в северной части озера Хубсугул) землетрясения.

Информация о положении эпицентров и гипоцентров землетрясений, их магнитуде и пр. предоставляется Байкальским филиалом Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (<http://seis-bykl.ru/>), поддерживающим сеть сейсмостанций для детального мониторинга сейсмичности западной части Байкальской рифтовой зоны.

ПРОБЛЕМАТИКА

Повышение сейсмической активности региона южного Байкала в 2020–2021 гг. совпало по времени с началом реализации в Институте земной коры СО РАН одного из блоков крупного научного проекта РАН “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”, задачей которого является открытие в Байкальском регионе пилотной сети полигонов комплексного мониторинга опасных геологических процессов.

На полигонах планируется проведение сейсмологического, геодезического, деформометрического, эманационного, гидрогеологического, инженерно-геологического и электромагнитного мониторинга. Представляется, что подобный комплекс физических наблюдений позволит получить информацию, позволяющую понять характер физических процессов, происходящих на различных стадиях подготовки землетрясений [Киссин, 2013; Соболев, Пономарев, 2003]. Настоящая статья посвящена обоснованию состоятельности начатого в конце 2020 г. электромагнитного (в частности – магнитотеллурического) мониторинга напряженно-деформированного состояния некоторых районов Байкальского рифта.

ПРЕДПОСЫЛКИ ОТРАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ

Идеологией электромагнитного мониторинга является выделение временных аномалий сигнала

электромагнитного поля, природа которых может быть связана с изменениями напряженно-деформированного состояния геологической среды в процессе подготовки землетрясений [Тарасов, 2010; Костерин и др., 2015].

Электромагнитный мониторинг геологической среды для оценки ее напряженно-деформированного состояния возможен в том случае, если существуют эффективные механизмы возбуждения электрических зарядов и токов, возникающих при изменении односторонних напряжений [Уваров и др., 2018], и вариации удельного электрического сопротивления литосферы, обусловленные изменением пористости геологической среды, минерализации и температуры трещинно-поровых флюидов в процессе подготовки землетрясений. При наблюдении магнитных и ортогональных к ним электрических компонент в одной точке полный тензор комплексного импеданса, а также магнитовариационный (типпер) и электро-теллурический параметры имеют вид (1):

$$\begin{aligned} \hat{Z} = f(T) &= \begin{vmatrix} \dot{Z}_{xx} & \dot{Z}_{xy} & \dot{Z}_{xz} \\ \dot{Z}_{yx} & \dot{Z}_{yy} & \dot{Z}_{yz} \\ \dot{Z}_{zx} & \dot{Z}_{zy} & \dot{Z}_{zz} \end{vmatrix}, \\ \hat{X} = f(T) &= |\dot{X}_{zx} \ \dot{X}_{zy}|, \\ \hat{Y} = f(T) &= |\dot{Y}_{zx} \ \dot{Y}_{zy}|. \end{aligned} \quad (1)$$

Если наблюдения проводятся синхронно в 2-х и более точках пространства, то к параметрам, описанным формулой (1), добавляются горизонтальные комплексные тензоры 2×2 – магнитный (\hat{M}) и теллурический (\hat{T}).

При этом в горизонтально-слоистой среде ненулевой является вторая диагональ первого минора матрицы импеданса (\dot{Z}_{xy} , \dot{Z}_{yx}), а магнитный и теллурический тензоры являются единичными. В реальных геоэлектрических средах условие горизонтально-слоистого разреза практически никогда не наблюдается, в силу чего ненулевыми являются все элементы магнитотеллурических тензоров.

Электромагнитные сигналы литосферного происхождения вызваны протеканием тектоно-электрических эффектов (число которых достигает полутора десятков), таких, например, как пьезоэлектрический, электрокинетический, магнитогидродинамический и т.п. Генерация электромагнитных сигналов геодинамической природы может возникать вдалеке от точки наблюдения, в волновой зоне зондирования и в непосредственной близости – в ближней зоне. Радиус круга, условно разделяющего ближнюю и волновую зоны зондирования, приближенно описывается формулой (2):

$$R \approx 2\rho h_{\text{эф}}, \text{ где } h_{\text{эф}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{10^7 \rho T}. \quad (2)$$

Таким образом, для верхней части разреза, где УЭС среды составляет 1–2 тыс. Ом · м и частоты, необходимые для зондирования, составляют более 10 Гц, условие волновой зоны соблюдается для расстояний более нескольких километров. В средней – нижней коре УЭС среды понижается до десятков Ом · м, периоды МТ поля превышают 10 с, соответственно, переход от ближней к дальней зоне зондирования начинается на расстоянии около 100 км. Представляется, что в пределах волновой зоны зондирования сигналы естественного электромагнитного поля литосферной и внешней природы различить путем вычисления относительных магнитотеллурических параметров невозможно. С теоретической точки зрения, могут быть выделены лишь аномальные колебания компонент, устойчиво предшествующие сильным сейсмическим событиям. Однако в силу их редкого наступления обеспечить достаточную для распознавания статистику практически нереально.

В ближней зоне источника ситуация для выделения сигналов литосферной природы более благоприятная. В зависимости от характера генерируемого электромагнитного поля относительные магнитотеллурические параметры будут отличаться от параметров магнитотеллурической природы, в силу чего должны наблюдаться соответствующие их вариации в зависимости от стадии процесса подготовки землетрясения и характера литосферных тектоноэлектрических эффектов. Наиболее благоприятными компонентами для этого являются вертикальные компоненты магнитного и электрического полей, поскольку амплитуда их отклика на колебания магнитотеллурической природы заметно (а для вертикальной электрической компоненты значительно) меньше отклика горизонтальных компонент [Орехова и др., 2021].

Возможности электромагнитных методов по мониторингу собственно геоэлектрического разреза различаются в зависимости от используемого вида поля (постоянного или переменного) и зоны зондирования (ближней или волновой). Опыт мониторинговых исследований на Байкальском прогностическом полигоне [Мандельбаум и др., 1996] показывает, что использование активных методов (ДЭЗ, ЗСБ) требует определенных материальных затрат, связанных с питанием источника электромагнитного поля. Кроме того, чувствительность поля постоянного тока и ближней зоны нестационарного поля к вариациям параметров геоэлектрического разреза пропорциональна с коэффициентом меньше единицы [Каленов, 1957; Исаев и др., 1970]. С этой точки зрения использование магнитотеллурического

зондирования имеет целый ряд преимуществ. В их числе – отсутствие затрат на возбуждение электромагнитного поля, большое количество изучаемых компонент (до 6-ти), в том числе аномальных вертикальных компонент, широкий спектральный диапазон измеряемых сигналов.

ОБЗОР ПОДХОДОВ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ МОНИТОРИНГУ

Электромагнитный мониторинг, как составная часть комплексного геолого-геофизического мониторинга, получил свое развитие с конца 70–х гг. прошлого века. Усилиями специалистов Министерства геологии СССР и Академии Наук СССР были развернуты пункты геодинимического мониторинга в нескольких сейсмоактивных областях Советского Союза. В Таджикистане был организован Гармский геодинимический полигон [Барсуков, 1970], в Киргизии – Бишкекский [Брагин и др., 1993], Туркмении – Ашхабадский [Жуков и др., 1982] на Украине – Карпатский [Сомов и др., 1978], в пределах Байкальской рифтовой зоны – Байкальский прогностический полигон [Ельцов и др., 2000].

Первоначально в силу существовавшего аппаратурно-методического уровня тех лет электромагнитный мониторинг проводился с использованием установок постоянного тока с достаточно большими разностями, позволявшими оценивать удельное электрическое сопротивление верхов земной коры. Для обеспечения приемлемого уровня сигналов зачастую внедрялись мощные источники тока, в том числе, МГД генераторы [Велихов, Волков, 1981]. Позднее, с развитием технологий индукционных электромагнитных зондирований методика электромагнитного мониторинга была расширена за счет использования нестационарных зондирований в ближней зоне и магнитотеллурических зондирований.

Важно отметить богатый опыт магнитотеллурического мониторинга, накопленный сотрудниками Научной станции РАН на Бишкекском геодинимическом полигоне [Баталева и др., 2013; Chelidze et al., 2006].

Изначально исследования земной коры Тянь-Шаня методами электромагнитных зондирований (в основном МТЗ) велись с 80-ых годов и относились к разряду структурных. В последние десятилетия Научной стацией РАН ведется разработка новых методов геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния геологической среды, ориентированных на краткосрочный прогноз землетрясений. В рамках этих работ на специально оборудованных стационарных пунктах Бишкекского геодинимического полигона с 1983 г. по настоящее время выполняются режимные электромагнитные наблюдения по методу зонди-

рования становлением поля и магнитотеллурического зондирования.

В качестве рабочей гипотезы для объяснения вариаций кажущегося сопротивления, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния массива горных пород, принимается гипотеза о перераспределении флюида между системами трещин, пронизывающими геологические объекты и обладающими различной ориентацией. Образование или закрытие сквозной сети пор (трещин), заполненных флюидом, проявляется в изменении электромагнитных характеристик среды, в образовании аномалий геофизических полей, а также в появлении анизотропии свойств пород. Такая феноменологическая модель хорошо объясняет уменьшение и увеличение электросопротивления по ортогональным азимутам, наблюдаемое в экспериментальных МТ данных по Тянь-Шанскому региону [Современная..., 2005].

В России нынешнего века электромагнитный мониторинг ведется в нескольких регионах. В частности, на Камчатке с 2000 г. проводятся скважинные измерения, важной частью которых является совместный анализ суточных вариаций кажущегося электрического сопротивления и геоакустической эмиссии, характер поведения которых в период устойчивого суточного хода практически идентичен (корреляция 0.8–0.99), но приобретает существенные различия за сутки до сейсмических события (корреляция 0.5–0.65) [Гаврилов и др., 2017].

С 2007 г. на Алтае ведутся наблюдения методом нестационарных электромагнитных зондирований с оценкой удельного электрического сопротивления и коэффициента электрической анизотропии геологического разреза. На основе решения обратной задачи оцениваются вариации геоэлектрических параметров среды и их взаимосвязь с сейсмическими процессами [Неведрова, Шалагинов, 2015].

На Байкальском прогностическом полигоне в районе дельты р. Селенги работы с установками постоянного тока были прекращены к 2010 г., а с 2003 по 2011 гг. на девяти пунктах электротеллурического мониторинга, расположенных вокруг озера, производились измерения горизонтальных и вертикальной электрических компонент магнитотеллурического поля с дискретизацией 0.1 Гц [Мороз и др., 2007].

С 2003 г. непосредственно в озере Байкал проводится “Байкальский эксперимент”, в ходе которого с дискретизацией 0.1 Гц измеряются сигналы вертикальной компоненты E_z , размещенной на базе “поверхность–дно”. Одним из главных его результатов является выявление аномального поведения вертикальной компоненты электрического поля, предшествующего Култукскому зем-

летрясению ($M_w = 6.3$), происшедшему в юго-западной оконечности оз. Байкал 27.08.2008 г. Примерно за трое суток до землетрясения наблюдались цуги правильных колебаний E_z с периодом около 90 с. По мере приближения землетрясения, амплитуда пульсаций от серии к серии нарастала примерно от 1 до 2 мкВ/м [Коротаев и др., 2015].

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходя из сказанного выше, очевидна актуальность и потенциал электромагнитного мониторинга. Применительно к Байкальской рифтовой зоне в рамках реализации Крупного проекта РАН в качестве электромагнитного вида мониторинга был выбран – магнитотеллурический.

Выбранная модификация магнитотеллурического мониторинга подразумевает регистрацию двух компонент геомагнитного (H_x , H_y) и трех компонент электротеллурического (E_x , E_y , E_z) полей. Регистрация горизонтальных компонент необходима для расчета импеданса с целью получения кривых ρ_k , анализ изменений которых позволит контролировать вариации электропроводности на глубине. Записи вертикальной компоненты электрического поля позволят оценить проявляемость эффектов, которые авторы предшествующих электромагнитных исследований наблюдали до Култукского землетрясения 2008 г. [Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., 2012; Коротаев и др., 2015].

В качестве первого стационарного пункта магнитотеллурического мониторинга был выбран один из полигонов Института “Куяда”, находящийся на западном побережье озера Байкал в двух километрах севернее деревни Бугульдейка. Преимуществом данного полигона является не только техническая оснащенность и удаленность от источников электромагнитных помех, но и приближенность к таким разрывным нарушениям как Приморский разлом и Обручевский сброс, по которым ожидаемо движение флюида, инициируемое в процессе подготовки землетрясений (рис. 1) [Киссин, 2009].

Пункт магнитотеллурического мониторинга представляет собой стационарно установленную пятикомпонентную установку зондирований (рис. 2), элементами которой являются:

- измерительный блок, размещенный в подземном боксе, состоит из двух станций МТЗ “Phoenix Geophysics”: МТУ-5А (измерение горизонтальных компонент) и МТУ-2Е (измерение вертикальной компоненты);

- горизонтальные электрические линии (E_x , E_y) длиной по 50 м;

- вертикальная электрическая линия, организованная на забое и в устье колонковой скважины глубиной 11 м, обсаженной пластиковыми трубами;

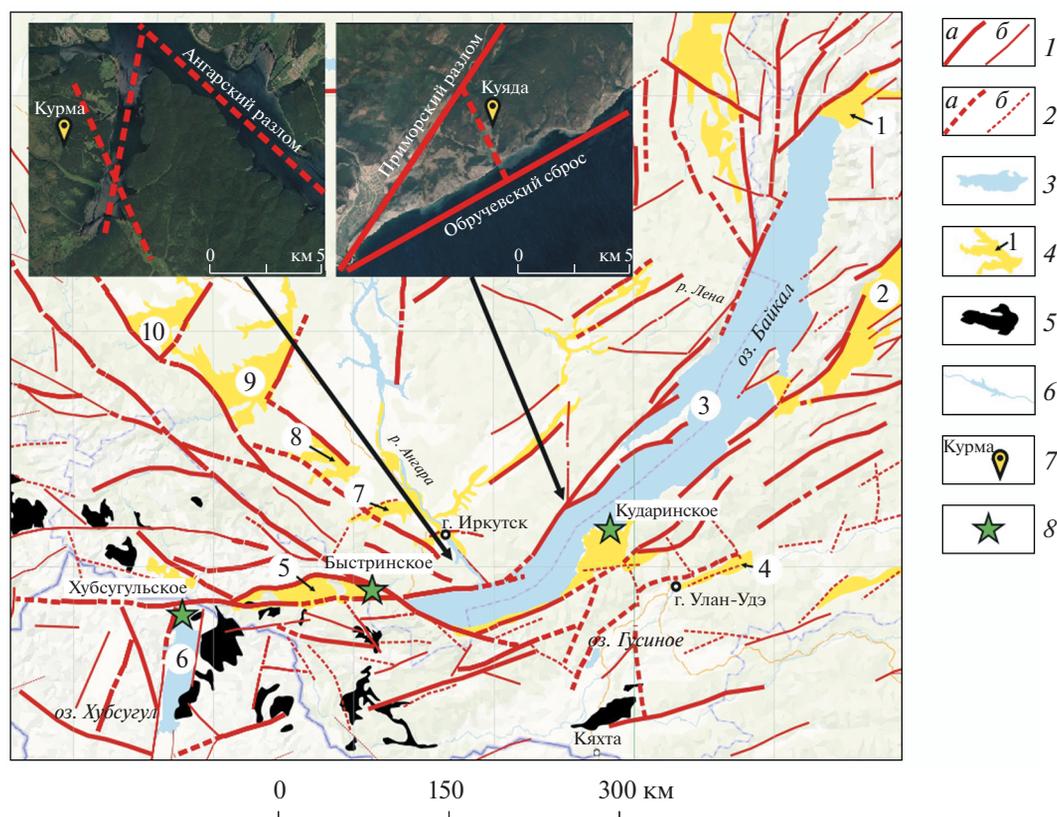


Рис. 1. Схема расположения главных структурных элементов Байкальской рифтовой зоны и пунктов магнитотеллурического мониторинга (по работе [Семи́нский, 2009], с изменениями).

Условные обозначения: 1, 2 – генеральные ($L > 80$ км) (а) и региональные ($34 < L < 80$ км) (б) разломы, отчетливо (1) или менее отчетливо (2) проявленные в рельефе; 3 – озера; 4 – главные кайнозойские впадины (1 – Кичерская, 2 – Баргузинская, 3 – Байкальская, 4 – Удинская, 5 – Тункинская, 6 – Хубсугульская, 7 – Китойская, 8 – Голуметьская, 9 – Окинская, 10 – Ийская); 5 – крупные базальтовые поля; 6 – гидросеть; 7 – пункты магнитотеллурического мониторинга; 8 – эпицентры сейсмических событий.

– горизонтальные магнитные каналы, размещенные в деревянных защитных пеналах, уложенных в грунт на глубину 5–10 см;

– семь заземлений на глубине 40–60 см (по два на каждый электрический канал и одно – в центре установки).

Для надежной регистрации электрических компонент магнитотеллурического поля использовались неполяризуемые электроды, изготовленные из гальванических элементов с окись-марганцевым деполаризатором. Их заземление осуществлено в лунки глубиной около 40 см, заполненные глинистой пастой, замешанной на подсолонном (100 г/л) автомобильном антифризе. Для предотвращения от высыхания каждое заземление было перекрыто заглушкой с пластиковой трубкой, через которую при необходимости осуществлялся долив жидкости. Представленная конструкция обеспечила возможность поддерживать уровень сопротивления заземления в пределах 1–3 тыс. Ом · м и собственную поляризацию электродов не более 5 мВ.

Установка была ориентирована по азимуту 345° , максимально близкому к направлению поляризации магнитотеллурического поля на периодах 10–100 с. Измерения компонент электромагнитного поля Земли проводятся еженедельно в диапазоне частот от 0.001 до 400 Гц, длительность рядов наблюдений составляет около 50 часов. Полученные материалы обрабатываются с помощью программы EPI-kit (ООО “Северо-Запад”).

ОТРАЖЕНИЕ КУДАРИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ДАННЫХ МАГНИТОТЕЛЛУРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Первое мониторинговое наблюдение на геодинамическом полигоне “Куяда” было произведено 25.10.2020 г., в результате которого, среди прочих, была получена кривая ρ_{xy} , представленная на рис. 3а (зеленая кривая). Левая ветвь кривой отражает наличие непроводящего блока основных кристаллических пород, а ее центральный минимум – проводящего слоя в земной коре.

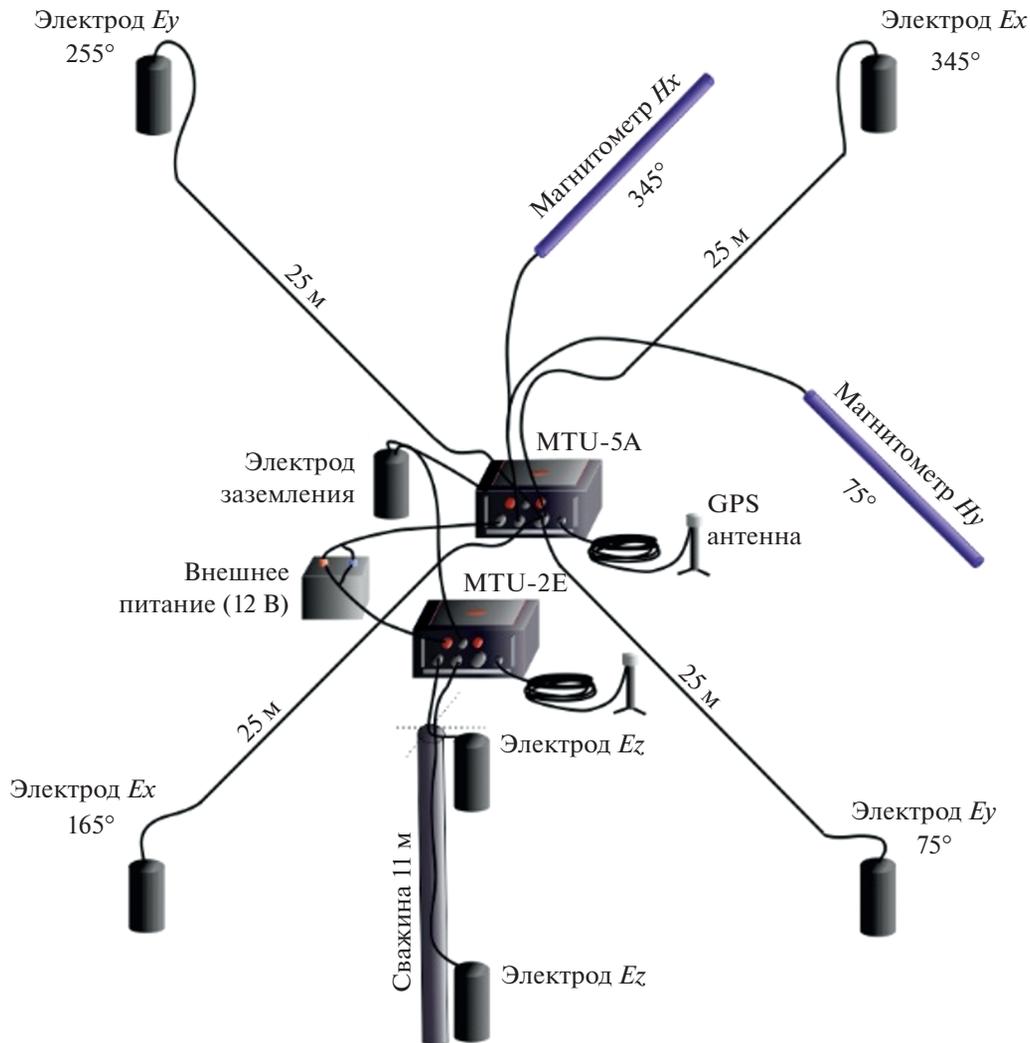


Рис. 2. Схема установки магнитотеллурического мониторинга на полигоне ИЗК СО РАН “Куяда”.

Положение левой нисходящей ветви поперечной кривой заведомо ниже нормального, что связано с гальваническим влиянием геоэлектрических неоднородностей разреза. Приведенная на рисунке кривая является поперечной к геологической неоднородности разреза (вероятно, Обручевскому сбросу или Приморскому разлому).

Уже через месяц еженедельных измерений было отмечено девятнадцатипроцентное изменение проводимости зондируемого пространства на глубине около 8–10 км (рис. 3а, синяя кривая).

Спустя полтора месяца после начала наблюдений в период очередного режимного измерения произошло Кударинское землетрясение (09.12.2020 г.), эпицентр которого располагался в районе залива Провал вблизи восточного побережья озера Байкал на удалении в 40 км от полигона.

По сравнению с уровнем ρ_t на периодах 10–200 с, характерного для наблюдений с мая теку-

щего года, за два месяца до события он был ниже примерно на 30%, а в месяц события – на 40%. Вероятнее всего, это является следствием гальванических влияний изменения проводимости латеральных разломных зон. Через пять месяцев измерений электропроводность зондируемого пространства вернулась на уровень несколько меньший исходному (рис. 3а, фиолетовая кривая), что говорит о том, что первое измерение (октябрь 2020 г.) зафиксировало отражение подготовки Кударинского землетрясения в электромагнитном поле.

Важно отметить надежность еженедельно получаемых магнитотеллурических передаточных функций ρ – среднеквадратическое расхождение среди них в группе (например, в период с декабря 2020 по март 2021 гг. или с мая 2021 г. по наст. время) составляет менее 3%, что подтверждает отсут-

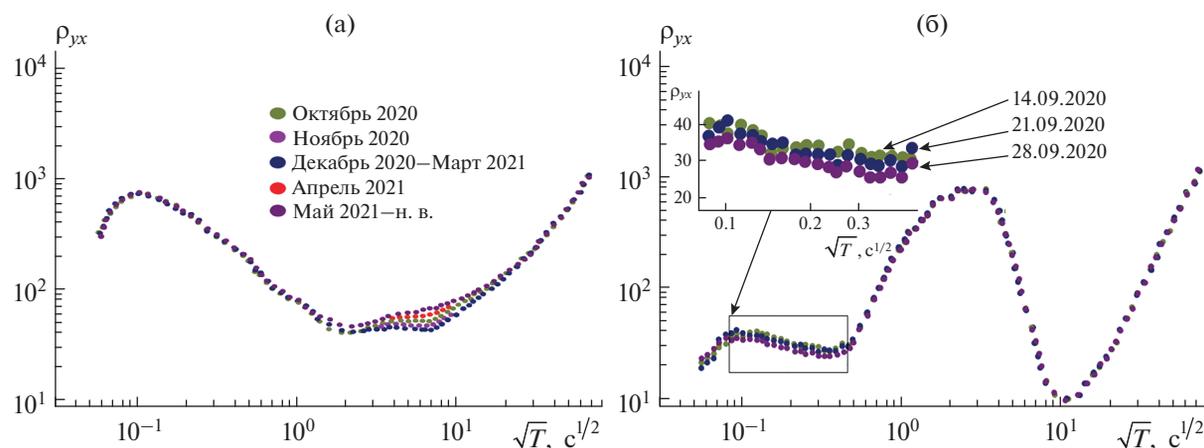


Рис. 3. Скриншот окна программы “Correct” (Ltd “Phoenix Geophysics”) с поперечными кривыми ρ_{yx} , полученными на полигонах: (а) — “Куяда” в период с 25.10.2020 г. по настоящее время (январь 2022 г.); (б) — “Курма” в период с 14.09.2020 по 28.09.2020 гг.

ствии критического влияния случайных факторов на формы анализируемых кривых МТЗ.

Следует отметить, что аномалии понижения уровня кривой МТЗ, квазипоперечной направленности региональных геоэлектрических неоднородностей, фиксировались и ранее. Так, на пункте МТЗ, расположенном на западном фланге Ангарского разлома, через неделю после Быстринского землетрясения уровень ρ_{τ} , отвечающего диапазону глубин нижней части осадочного чехла и верхов кристаллического фундамента, понизился примерно на 20% (рис. 1).

На рис. 3б показаны поперечные кривые ρ_{yx} , полученные на пункте МТЗ за 7 дней до Быстринского землетрясения (14.09.2020 г.), в день события (21.09.2020 г.), а также через 7 дней после события (28.09.2020 г.). Важно отметить, что кривая, полученная через две недели, а также через 10 мес. после землетрясения, полностью повторила кривую, полученную за 7 дней до события.

Вторым важным наблюдением, сделанным в период Кударинского землетрясения, кроме изменения электропроводности зондируемого породного массива, является аномальное поведение вертикальной компоненты электротеллурического поля E_z , проявившееся за сутки до сейсмического события (рис. 4). Регистрация МТ поля была начата 09.12.2020 г. в 13 ч 09 мин 02 с по Иркутскому времени. Примерно через час характер флуктуаций E_z существенно изменился — вместо хаотичных колебаний в поле появились отчетливые U -образные колебания с периодом 2–3 с и относительной амплитудой 1.5–2.5 мкВ (на линии 11 м). В течение примерно 1.5 ч амплитуда вариаций несколько увеличивалась, а период увеличился до 6–30 с. Следующие интервалы прояв-

ления подобных колебаний длительностью от 5 до 10 мин отмечены в 16:10, 16:50, 17:50 и 20:00.

После сейсмического события по настоящее время аномальные вариации подобного характера не фиксировались. Кроме того, они отсутствовали в течение всей записи на горизонтальных компонентах электромагнитного поля.

ОБСУЖДЕНИЕ

Безусловно, на основании анализа относительно короткого ряда режимных магнитотеллурических наблюдений, которым располагают авторы статьи, невозможно уверенно подтвердить и объяснить связь наблюдаемых изменений геоэлектрических свойств разреза и произошедших землетрясений. Однако с высокой вероятностью можно полагать, что эта связь существует и может объясняться следующим образом. Первым в череде относительно крупных для Байкальского региона сейсмических событий произошло Быстринское, однако ввиду его удаленности (на 80 км) от временного пункта магнитотеллурического мониторинга в районе Курминского залива, а главное удаленности от Приморского разлома, который мог служить магистралью для флюида, приведенного в движение горным давлением, изменение проводимости отразилось относительно слабо и только в осадочном чехле.

Вторым сейсмическим событием в рассматриваемом диапазоне времени было Кударинское, его подготовка, вероятно, началась сразу после Быстринского события, что косвенно подтверждает предположение, что произошедшие землетрясения может провоцировать последующее. Следствие подготовки этого землетрясения в виде изменения электропроводности было зафиксировано в первых октябрьских измерениях 2020 г.

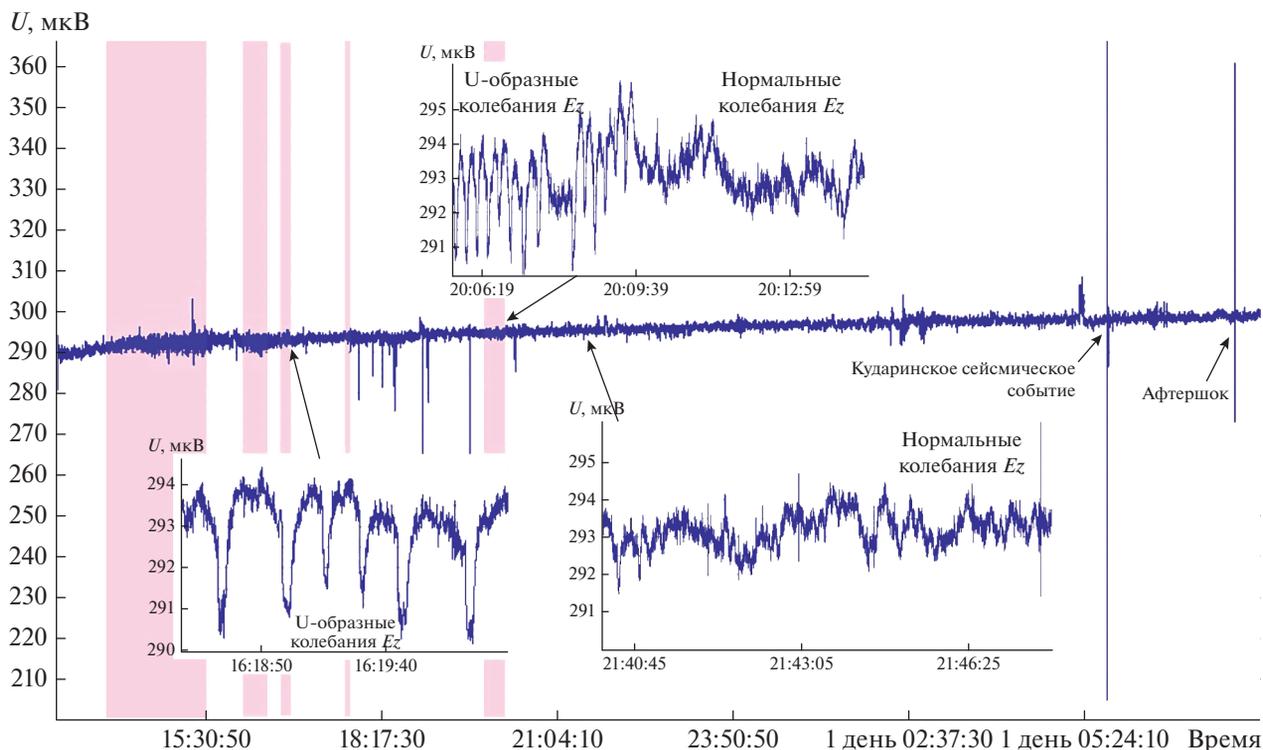


Рис. 4. Скриншот окна программы “ViewField” (Поспеев А.В.) с визуализацией записи вертикальной электрической компоненты E_z в период 09–10.12.2020 г. (полигон “Куяда”). Розовые полигоны – периоды следования аномальных U -образных колебаний с частотами 5–30 с.

на пункте комплексного мониторинга “Куяда”. Высокая чувствительность наблюдаемых характеристик к указанному событию может объясняться небольшим расстоянием от эпицентра (40 км) землетрясения и крупнейших рифтовых разрывных нарушений (Приморский разлом и Обручевский сброс), по которым вероятно движение флюида. U -образные колебания, зарегистрированные посредством скважинных измерений за сутки до землетрясения, возможно, являются отражением электрических разрядов, возникающих при сжатии кварцсодержащих пород – пьезоэффектами. Напомним, что подобные эффекты наблюдались коллегами и перед подготовкой Култукского землетрясения 2008 г. [Коротаяев и др., 2015; Мороз и др., 2012]. Предположение о связи пьезоэлектрического эффекта у кварцсодержащих пород и повышения горного давления, связанного с сейсмической активностью высказывалось и ранее [Воларович, Пархоменко, 1954].

Ввиду большой удаленности от пункта магнитотеллурического мониторинга отражение подготовки Хубсугульского землетрясения в геоэлектрических характеристиках зондируемого пространства отмечено не было. Или же оно было настолько незначительным, что на фоне релаксации флюидодинамической системы после Кударинского землетрясения было не выявлено.

ВЫВОДЫ

Представленные в статье первые результаты мониторинговых наблюдений компонент естественного электромагнитного поля применительно к центральной части Байкальского рифта говорят о наличии аномалий электромагнитного поля, которые при первом приближении ассоциируются с влиянием сейсмических событий с магнитудой более 5.4 и удалением эпицентра от пункта наблюдений до 80 км. Природу упомянутых аномалий авторы связывают со следствием увеличения горного давления, возрастающего при подготовке землетрясения, а в частности выдавливанием флюида в нарушенные зоны земной коры (при пересчете горизонтальных компонент электромагнитного поля в кривые ρ_k проявляется как уменьшение кажущегося электрического сопротивления более чем на 10%) и пьезосейсмическими эффектами, возникающими при возрастании давления на кварцсодержащие породы (на записях вертикальной компоненты электротеллурического поля проявляется как U -образные колебания с периодом 5–30 с). Иными словами, применение магнитотеллурического мониторинга имеет потенциал прогноза относительно крупных для Байкальского рифта сейсмических событий путем выделения среднесрочных и краткосрочных предвестников.

Однако для подтверждения представленной выше модели отражения предвестников землетрясений в электромагнитном поле необходимо не только увеличение массива режимных наблюдений, непрерывность регистрации компонент поля, а главное — увеличение сети пунктов мониторинга. Если следовать выдвинутой гипотезе активизации флюидомиграции перед сейсмическим событием — целесообразно располагать пункты наблюдений вблизи крупных тектонических нарушений. В планах авторов статьи есть до 2023 г. организация еще двух пунктов мониторинговых наблюдений в Байкальском регионе, расположенных вблизи п. Зун-Мурино (Тункинская долина) и п. Узур (о. Ольхон), что позволит контролировать кажущееся электрическое сопротивление породного массива территорий с наибольшей плотностью населения Байкальского региона.

Также, в период подготовки настоящей статьи ведется разработка станции магнитотеллурического зондирования SMT-32 (ИЗК СО РАН, ООО «СИГМА-ЭЛЕКТРОНИКА»), обеспечивающей непрерывную регистрацию 6 компонент электромагнитного поля ($E_x, E_y, E_z, H_x, H_y, H_z$) и снабженную модулем телеметрии, что позволит в режиме *online* производить анализ мониторинговых наблюдений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работы проводились в рамках проекта Минобрнауки РФ № 075-15-2020-787 “Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории”.

В работе задействовалось оборудование ЦКП “Геодинамика и геохронология” Института земной коры СО РАН в рамках гранта №075-15-2021-682.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны ведущему инженеру ИЗК СО РАН Тупищину В.А. и безвременно ушедшему в 2021 г. генеральному директору ООО “Байкальская геофизическая партия” Гилеву А.Г. за техническую поддержку, оказанную в ходе проведения исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барсуков О.М. О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1970. № 1. С. 84–89.

Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. К вопросу о взаимосвязи вариаций электропроводности земной коры и геодинамических процессов // Физика Земли. 2013. № 3. С. 105–105.

Брагин В.Д., Вольхин А.М., Zubovich A.B. Геологическое строение и сейсмичность Бишкекского прогностиче-

ского полигона и сопредельных территорий. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях / Под ред. Велихова Е.П., Зейгарника В.А. М.: Наука. 1993. С. 10–19.

Велихов Е.П., Волков Ю.М. Перспективы развития импульсной МГД-энергетики и ее применение в геологии и геофизике. Препр. ИАЭ. № 3436. М. 1981. 28 с.

Волярович М.П., Пархоменко Э.И. Пьезоэлектрический эффект горных пород // Докл. АН СССР. Геофизика. 1954. Том ХСІХ. № 2. С. 239–242.

Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В. Скважинные геоакустические измерения в системе комплексного геофизического мониторинга и прогноза землетрясений на Камчатке // Уч. зап. физ. фак-та МГУ. 2017. № 5. С. 1750802-1 —11750802-4.

Ельцов И.Н., Манштейн А.К., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Сидорин А.Я. Электромагнитные зондирования на Гармском полигоне методом становления поля. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. 2000. М.: ОИФЗ РАН. С. 183–192.

Жуков В.С., Лыков В.И., Сухомлин В.Ф. Некоторые результаты электрометрических наблюдений на Ашхабадском геодинамическом полигоне // Изв. АН Туркм. ССР. Сер. Физико-тех., химич. и геологич. наук. 1982. № 2. С. 81–84.

Исаев Г.А., Кауфман А.А., Курилло В.Н., Морозова Г.М., Рабинович Б.И. Интерпретация трехслойных кривых типа Н в методе зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБЗ) // Геология и геофизика. 1970. № 5. С. 121–125.

Каленов Е.Н. Интерпретация кривых вертикального электрического зондирования. М.: Наука. 1957. 475 с.

Киссин И.Г. О системном подходе в проблеме прогноза землетрясений // Физика Земли. 2013. № 4. С. 145–145.

Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука. 2009.

Коротаев С.М., Буднев Н.М., Сердюк В.О., Зурбанов В.Л., Миргазов Р.Р., Мачинин В.А., Портянская И.А. Результаты мониторинга вертикальной компоненты электрического поля в озере Байкал // Физика Земли. 2015. № 4. С. 148–148.

Костерин Н.А., Пилипенко В.А., Дмитриев Э.М. О глобальных ультранизкочастотных электромагнитных сигналах перед землетрясениями // Геофизические исследования. 2015. Т. 16. № 1. С. 24–34.

Крылов С.В., Мандельбаум М.М., Мишенькин Б.П., Мишенькина З.Р., Петрик, Г.В., Селезнев В.С. Недр Байкала по сейсмическим данным. 1981. 105 с.

Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406.

Мандельбаум М.М., Энов М.И., Морозова Г.М., Неведрова Н.Н., Ельцов И.Н. Сейсмическая активность и динамика электропроводности земной коры на Байкальском полигоне // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 6. С. 88–94.

Мельникова В.И., Гилева Н.А., Радзиминович Я.Б., Масальский О.К. О возможности возникновения сильных землетрясений в западном Забайкалье. Всероссийская конференция “Геофизические методы исследования земной коры”, посвященная 100-летию со дня рожде-

ния академика Н.Н. Пузырева. Новосибирск: изд-во ИНГГ СО РАН. 2014. С. 194–197.

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли. 2012. № 5. С. 64–64.

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А., Моги Т. Методика и результаты мониторинга естественного электрического поля Земли в Байкальской рифтовой зоне // Физика Земли. 2007. № 11. С. 37–49.

Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. 2015. № 1. С. 31–40.

Орехова Д.А., Кругляков М.С., Коротаев С.М., Буднев Н.М., Кириаков В.Х., Миргазов Р.Р. О возможности выбора между конкурирующими моделями Байкальского рифта по магнитовариационным наблюдениям в районе глубоководного мониторинга E_z . VIII Всероссийская школа-семинар ЭМЗ-2021. Москва, 4–9 октября 2021. С. 1–4

Семинский К.Ж. Главные факторы развития впадин и разломов Байкальской рифтовой зоны: тектонофизический анализ // Геотектоника. 2009. № 6. С. 52–69.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003.

Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Лаверов Н.П., Макаров В.И. (ред.) М.: Научный мир. 2005. 400 с.

Сомов В.И., Кузнецова В.Г., Соллогуб В.Б., Мельничук М.И., Кутас Р.И., Пронишин Р.-М.С., Костюк О.П., Билинский А.И., Бурак Я.И., Галапац Б.П. Карпатский геодинамический полигон. М.: Советское радио. 1978. 127 с.

Тарасов Н.Т. Влияние сильных электромагнитных полей на скорость сейсмотектонических деформаций // Докл. РАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 689–692.

Уваров В.Н., Ларионов И.А., Малкин Е.И. Электромагнитные проявления активной земной коры // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2018. № 5(25). С. 115–129.

Chelidze T. et al. Influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquake time distribution in the Bishkek test area (Central Asia) // Ann. Geophys. 2006. V. 49. № 4/5.

Molnar P., Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision // Science. 1975. V. 189. № 4201. P. 419–426.

Reflection of Strong 2020–2021 Baikal Rift Earthquakes in the Earth's Magnetotelluric Field Observation Data

I. K. Seminsky^{a, b, *} and A. V. Pospeev^{a, **}

^a*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

^b*SIGMA-GEO LLC, Irkutsk, Russia*

^{*}*e-mail: iks@crust.irk.ru*

^{**}*e-mail: avp@crust.irk.ru*

In this paper, we explore the findings of monitoring the components of the Earth's natural electromagnetic (EM) field obtained in 2020–2021, as well as their link with rather strong seismic events within Baikal Rift Zone (in particular, the Kударин earthquake (Dec. 9, 2020, $M_w = 5.5$)). During the observations of the magnetotelluric field more than one month prior to the seismic event, the increased conductivity of the tensor-sensitive parts of the sounded soil was recorded due to the displaced release of conducting fluid to the weak crust zones before the earthquake. 24 hours before the seismic event, the anomalous behavior of the electrical field vertical component (E_z) was observed as U-shaped oscillations every 5–30 s due to the electrical charge excitation and relaxation from the compression of quartz-containing rock. The first approximation showed that the analysis of magnetotelluric (MT) monitoring data could help identify medium- and short-term precursors of seismic events.

Keywords: earthquake, the Kударин earthquake, the Bystrinsky earthquake, electrical conductivity, crust conductive layer, magnetotelluric (MT) sounding, monitoring, Baikal Rift Zone