

УДК 550.370+550.837.21+551.2

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИТОСФЕРЫ ОБЛАСТЕЙ ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ОРОГЕНИИ, НА ПРИМЕРЕ ТЯНЬ-ШАНЯ

© 2022 г. А. К. Рыбин^{1, *}, Е. А. Баталева¹, П. Н. Александров^{2, **}, К. С. Непейна¹

¹Научная станция РАН в г. Бишкеке (НС РАН), г. Бишкек, Киргизия

²Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

*E-mail: rybin99@yandex.ru

**E-mail: alexandr@igemi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 27.02.2022 г.

После доработки 12.03.2022 г.

Принята к публикации 15.04.2022 г.

Электромагнитные исследования динамики напряженно-деформированного состояния геосреды основаны на анализе двух групп физических явлений. К первой относятся явления, связанные с динамикой электрических свойств пород при изменении их трещиноватости, пористости, флюидо-содержания, структуры и текстуры, температуры и давления т.п. Ко второй – генерация источников электромагнитного поля эндогенного (геодинамического) происхождения в процессе необратимых деформаций геосреды. В работе представлены практические результаты исследований естественного электромагнитного поля Земли, направленные на изучение современной геодинамики литосферы Тянь-Шаня и полученные за 40-летний период функционирования геодинамического полигона Научной станции РАН. Экспериментальные результаты изучения первой группы явлений основаны на анализе изменений во времени магнитотеллурических передаточных функций. При этом предполагается, что современные геодинамические процессы, в том числе и катастрофические, например, землетрясения, являются триггером для процессов трещинообразования, что в свою очередь, приводит к изменению порово-трещинного пространства горных пород и перераспределением флюидов в них, а следовательно, и изменению электропроводности геологической среды. Практические результаты изучения второй группы явлений опираются на представления о том, что современные геодинамические процессы в земной коре Тянь-Шаня, связанные с необратимыми деформациями горных пород, формируют источники электромагнитного излучения, приводящие к вариациям электромагнитного поля эндогенного происхождения, которые можно наблюдать на поверхности Земли.

Ключевые слова: магнитотеллурическое зондирование, кажущееся электросопротивление, необратимые деформации, электромагнитное поле эндогенного происхождения, энергетическая характеристика, современные геодинамические процессы, Тяньшанский ороген.

DOI: 10.31857/S0002333722050234

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение современных геодинамических процессов в широком диапазоне явлений от практически незаметных изменений напряженно-деформированного состояния геологической среды до катастрофических природных катаклизмов (землетрясений, оползней и др.) представляет собой одну из самых актуальных фундаментальных научных проблем в области наук о Земле. Представления о том, что изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды (естественного или техногенного характера), происходящие в настоящее время, могут отра-

жаться в физических полях и физических параметрах горной породы дают нам определенные основания считать, что геодинамические процессы можно отслеживать с помощью наблюдений электромагнитного поля естественного и искусственного происхождения на поверхности Земли [Соболев, 1993; Светов и др., 1997]. Электромагнитные исследования изменения напряженно-деформированного состояния геосреды основаны на анализе двух групп физических явлений. К первой группе относятся явления, связанные с изменением электрических свойств горных пород при изменении их трещиноватости, пористо-

сти, флюидонасыщения, структуры и текстуры, температуры и давления т.п. Ко второй – генерация источников электромагнитного поля эндогенного происхождения в процессе необратимых (процессы трещинообразования) деформаций земной коры.

Первая группа явлений характеризует динамику свойств геоэлектрического разреза при изменении напряженно-деформированного состояния геосреды, например, в процессе подготовки землетрясения. Начало этому направлению исследований дали пионерские работы О.М. Барсукова [Барсуков, Сорокин, 1973]. В последующие годы данное направление электромагнитных исследований получило активное распространение во многих геодинамически активных регионах: на Алтае [Неведрова, Пономарев, 2018; Неведрова, Шалагинов, 2015], на Тянь-Шане [Трапезников и др., 1997; Баталев и др., 1989; 2017; 2019; Баталева, Мухаммадеева, 2018; Рыбин и др., 2001; 2008; 2011], на Камчатке [Мороз, Гонтовая, 2018; Муратов и др., 2018; Уваров и др., 2018], на Ашхабадском прогностическом полигоне [Авагимов и др., 2005], на геофизических полигонах Европейской части России [Александров, Модин, 2015; Модин и др., 2014], на Кольском полуострове [Жамалетдинов и др., 2000] и др.. По результатам этих исследований для условий различных геодинамических обстановок экспериментально подтверждена связь между вариациями электрического сопротивления и изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры исследуемых регионов.

Вторая группа явлений связана с генерацией источников электромагнитного поля эндогенного происхождения и обусловлена необратимыми деформациями, которые приводят к нарушению сплошности горной породы за счет разрушения атомных связей. Эти процессы генерируют эндогенные источники как электромагнитного, так и сейсмического полей [Гохберг и др., 1988; Соболев, 1993]. Необратимые деформации сопровождаются процессом трещинообразования (появление, раскрытие и закрытие трещин), что отождествляется с дискретно появляющимися в пространстве элементарными источниками упругих и электромагнитных полей [Беляков и др., 2016]. Процесс трещинообразования проявляется в виде связанных явлений – электромагнитном излучении (ЭМИ), сейсмоакустической эмиссии (САЭ) и механической деформации [Жуков и др., 1991; Chikov, 2010; Соболев, Майбук, 2013; Соболев, 2014; Соболев и др., 2016].

Отметим, что в настоящее время накоплен большой, но весьма противоречивый опыт “автономного” проведения этих двух направлений электромагнитных исследований. Идея объеди-

нения этих двух направлений исследований была высказана Б.С. Световым [Светов, 1997]. Для реализации предложенного им подхода был разработан макет компьютеризированного технологического комплекса магнитотеллурического мониторинга геодинамических процессов, который позволял одновременно получать независимую информацию как об изменениях геоэлектрического разреза, так и о генерируемых в земной коре электромагнитных полях. С использованием комплекса был проведен первый непродолжительный цикл режимных наблюдений естественного электромагнитного (магнитотеллурического) поля в широком диапазоне частот на территории Северного Тянь-Шаня. К сожалению, эти работы были прекращены по техническим причинам и не получили дальнейшего развития.

Рассмотрим более подробно практические результаты электромагнитных исследований по изучению современной геодинамики литосферы Тянь-Шаня, полученные за 40-летний период функционирования геофизического полигона Научной станции РАН. При этом мы остановимся только на результатах исследований естественного электромагнитного поля Земли, не касаясь результатов электромагнитного мониторинга, который осуществлен силами Научной станции с помощью мощных искусственных источников тока (МГД, ЭРГУ-600).

Экспериментальные результаты изучения первой группы явлений, полученные в разное время на территории Тянь-Шаня, основаны на анализе изменений во времени магнитотеллурических передаточных функций. При этом полагаем, что современные геодинамические процессы, в том числе и катастрофические, например, землетрясения, являются триггером для процессов трещинообразования, что, в свою очередь, приводит к изменению порово-трещинного пространства горных пород и перераспределению флюидов в них, а следовательно, и изменению электропроводности геологической среды.

Практические результаты изучения второй группы явлений основаны на представлении о том, что современные геодинамические процессы в земной коре Тянь-Шаня, связанные с необратимыми деформациями горных пород, формируют источники электромагнитного излучения, приводящие к вариациям электромагнитного поля эндогенного происхождения, которые можно наблюдать на поверхности Земли.

2. ВАРИАЦИИ КАЖУЩЕГОСЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ – ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕОСРЕДЫ

2.1. Методика азимутального магнитотеллурического (МТ) мониторинга

С целью анализа взаимосвязи вариаций кажущегося сопротивления с изменением напряженно-деформированного состояния участков земной коры Тянь-Шаня была предложена методика азимутального магнитотеллурического мониторинга [Баталева и др., 2013]. Методика основана на пересчете значений тензора импеданса для каждой из часовых реализаций на азимуты через 15° [Бердичевский и др., 1997] и определении вариаций кажущегося сопротивления в зависимости от направления. При этом вычисления значений компонент тензора импеданса и соответствующие вариации по произвольным азимутам осуществляются по формуле:

$$\begin{aligned} Z_{xy}(\alpha) &= Z_{xy} \cos^2 \alpha - Z_{yx} \sin^2 \alpha - \\ &\quad - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \\ Z_{yx}(\alpha) &= Z_{yx} \cos^2 \alpha - Z_{xy} \sin^2 \alpha - \\ &\quad - (Z_{xx} - Z_{yy}) \sin \alpha \cos \alpha, \end{aligned}$$

где Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} – компоненты тензора импеданса $[Z]$ в направлении, соответствующем их первому индексу. Ориентация компонент импеданса соответствует ориентации компонент электрического поля.

Частотно-временные ряды (ЧВР) представляют собой форму визуализации изменчивости структуры измеряемых компонент электромагнитного поля в зависимости от логарифма периода зондирования при повороте системы координат на определенный угол (в градусах).

Надежность расчетов с использованием методики азимутального МТ мониторинга была подтверждена на практике в ходе специального полевого эксперимента, описанного в работе [Баталева и др., 2013]. В исследованиях, связанных с развитием методики азимутального магнитотеллурического мониторинга, нами рассматриваются временные ряды вариаций (отклонения от среднего) для электромагнитных параметров геологической среды по азимутам 0° – 180° в зависимости от периода зондирования. Однако при более детальном анализе временных рядов магнитотеллурического мониторинга оказалось, что представление данных в виде корреляционных полярных диаграмм является не только более наглядным, но и может дать важную дополнительную информацию [Баталева, 2016].

2.2. Камбаратинский эксперимент

Выразительный пример результативного применения методики азимутального мониторинга был получен в рамках магнитотеллурического эксперимента, проведенного в пункте крупномасштабного промышленного взрыва “Камбарата” мощностью 2.914 килотонны [Баталева и др., 2013]. Благодаря своей мощности Камбаратинский взрыв явился неординарным сейсмическим событием, сопоставимым по сейсмическому эффекту с подземными ядерными взрывами и тектоническими землетрясениями и был зарегистрирован как землетрясение 30-ю сейсмическими станциями мира [Брагин, 2011].

Камбаратинский эксперимент включал в себя сейсмологические, электромагнитные и GPS-наблюдения, выполненные силами Научной станции РАН. Расстояние от пункта взрыва до расположения измерительной магнитотеллурической станции Феникс MTU 5D составляло 5.7 км (рис. 1).

Процесс резкого изменения напряженно-деформированного состояния наблюдался в Камбаратинском эксперименте при тектонической разгрузке после реализации наведенных взрывом сейсмических событий. В итоге, с помощью методики азимутального мониторинга в регистрируемых временных рядах кажущегося сопротивления до и после взрыва удалось выделить характерные признаки изменения напряженно-деформированного состояния среды, обусловленные динамикой сейсмического процесса. Подробно магнитотеллурические результаты Камбаратинского эксперимента представлены в целой серии работ [Баталева и др., 2013; 2014; Баталева, Баталев, 2017; Bataleva, 2019; Rybin et al., 2020].

На рис. 2 представлены частотно-временные ряды с шагом $15 (30)^\circ$ по азимуту, где отложены вариации кажущегося сопротивления (ΔR_r), т.е. разница между средним и текущим значениями по рассматриваемому азимуту. Формирование указанных временных рядов вариаций МТ параметров производилось по следующей схеме: 1) обработка записей МТЗ с помощью программы SSMT-2000 и вычисление значений частотных зависимостей тензора импеданса для непересекающихся часовых или двухчасовых интервалов в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с (общая длительность МТ записи на режимных пунктах наблюдения – не менее 48 ч); 2) пересчет значений тензора импеданса на сетку азимутов через 15 градусов. В результате полученный массив экспериментальных данных включает в себя значения компонент тензора импеданса как минимум для 48 интервалов длительностью по одному часу в диапазоне периодов от 0.01 до 100 с и диапазоне азимутов – от 0° до 180° .

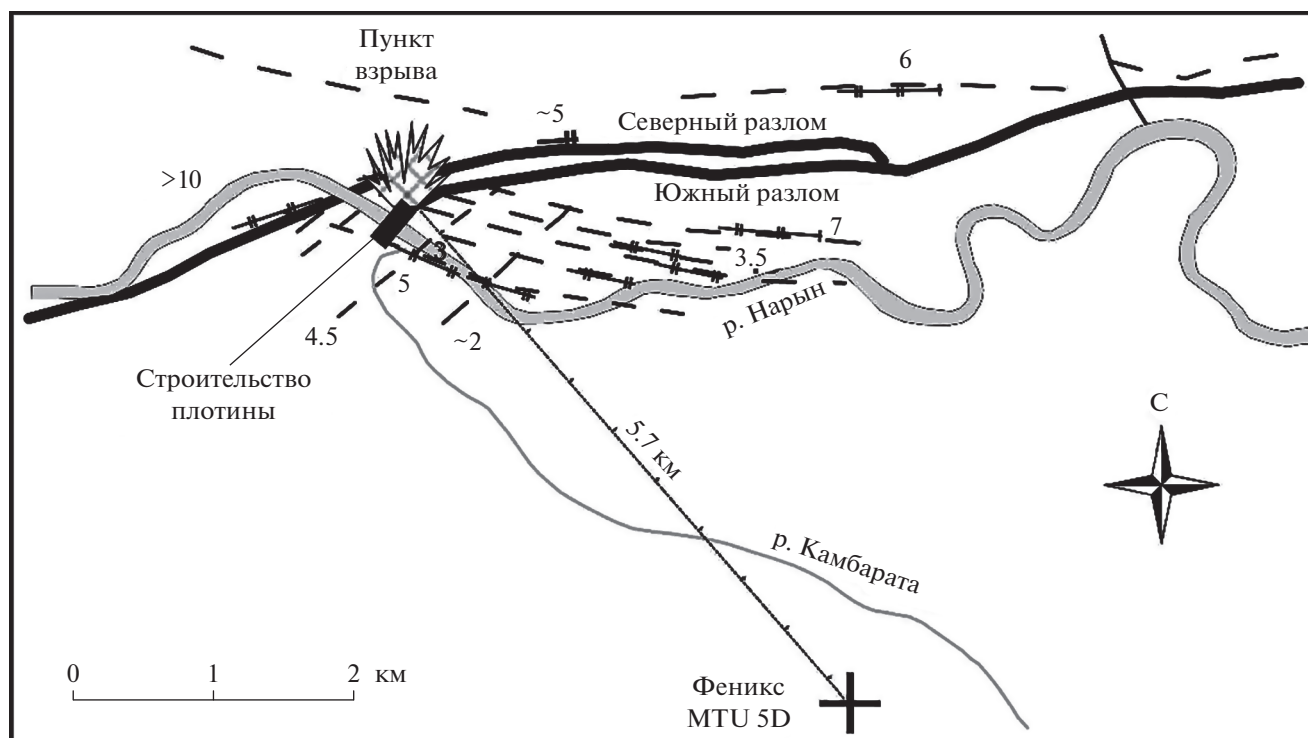


Рис. 1. Схема расположения крупномасштабного промышленного взрыва в районе Камбаратинской ГЭС-2 (22.12.2009 г., мощность взрыва 2914 тонн). Цифрами обозначены смещения цоколя аллювиальных террас, произошедшие в голоцене (по работе [Брагин, 2011]).

Данные, полученные в ходе Камбаратинского эксперимента в результате проведенных сейсмических наблюдений, позволили установить наличие обусловленных взрывом подвижек по разлому, прилегающему к пункту взрыва, а также зафиксировать через 12 с после взрыва серию наведенных слабых сейсмических событий на расстоянии от пункта взрыва около 16 км [Брагин, 2011].

Наиболее яркая взаимосвязь вариаций кажущегося сопротивления ($\Delta\rho_k$) и сейсмических событий наблюдается для азимутов 15° , 150° , 165° и 180° . Вариации ρ_k имеют одну тенденцию (возрастание или убывание) для всех азимутов, причем для ЧВР рис. 2 характерна резкая смена знака вариаций ρ_k . Такой характер вариаций может быть интерпретирован либо влиянием электромагнитных помех, отражающихся на всех азимутах, либо в рамках гипотезы [Vogomolov et al., 2007] о перераспределении жидкостей в порово-трещинном пространстве — перемещением поровых жидкостей в вертикальном направлении. Оба этих варианта должны быть либо подтверждены, либо опровергнуты дополнительной информацией. В данном случае более вероятной является вторая причина, т.к. наблюдаемый в районе Камбараты уровень промышленных электромагнитных помех низок, и регистрация компонент МТ

поля осуществлялась в благоприятных условиях. Аномальные изменения для указанных азимутов частотно-временных рядов азимутального МТ мониторинга соответствуют гипотезе [Bragin et al., 2005] о перераспределении поровых жидкостей в порово-трещинном пространстве, что морфологически выражается в ортогональности азимутов, на которых происходят уменьшения и увеличения кажущегося сопротивления.

Вертикальными линиями на рис. 2 показаны моменты взрыва и землетрясений, в том числе инициированных промышленным взрывом. Энергетический класс данных сейсмических событий невелик, но с учетом расстояний, значительных деформационных процессов, возникших в зондируемом объеме среды, наблюдаются интенсивные вариации кажущегося сопротивления в указанные моменты времени.

Важнейшим “геодинамическим” результатом анализа частотно-временных рядов азимутально-го магнитотеллурического мониторинга Камбаратинского эксперимента является выделение направлений максимальных и минимальных изменений кажущихся электросопротивлений, предположительно соответствующих осям сжатия и растяжения деформационного процесса среды [Баталева и др., 2013].

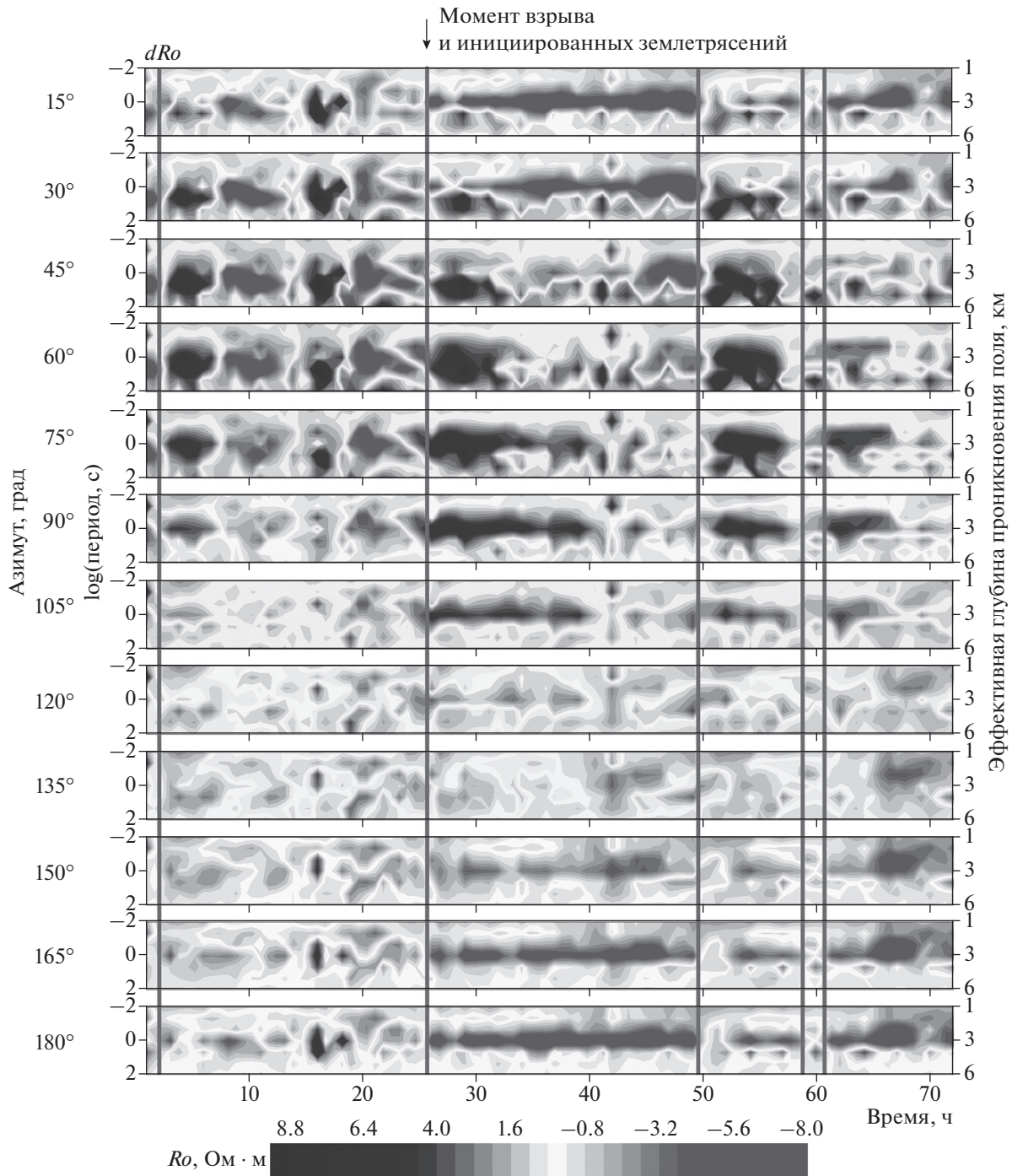


Рис. 2. Частотно-временные ряды с шагом 15° по азимуту, отражающие вариации кажущегося сопротивления до и после крупномасштабного промышленного взрыва в районе Камбаратинской ГЭС-2. Вертикальные линии отмечают моменты взрыва и близких сейсмических событий, инициированных взрывом.

2.3. Мониторинговые наблюдения на пункте Укок-2

Приведем еще пример экспериментального подтверждения факта взаимосвязи вариаций электрического сопротивления с изменением напряженно-деформированного состояния земной

коры Тянь-Шаня, полученные в последние годы с использованием методики азимутального магнитотеллурического мониторинга.

Рассмотрим результаты анализа полевых материалов, полученных на режимном мониторинговом пункте МТЗ в Кочкорской впадине Укок-2.

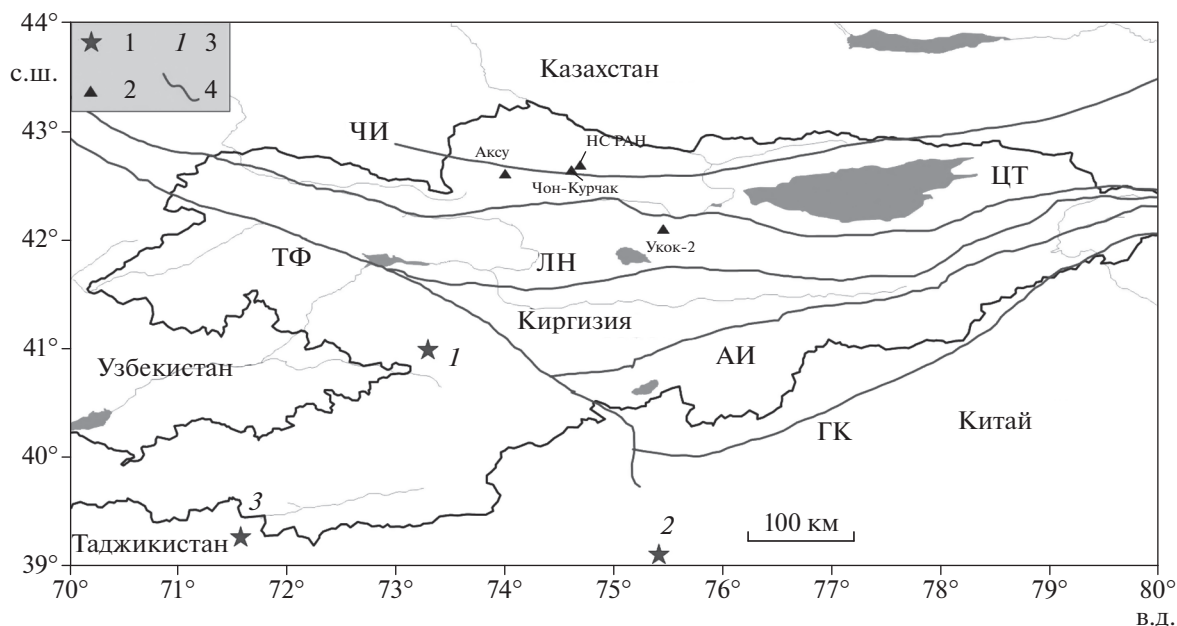


Рис. 3. Распределение сейсмичности за выбранный период наблюдений по каталогам Научной станции РАН (KNET), Института сейсмологии КР (KRNET) и Международного сейсмологического центра (ISC): 1 – эпицентры землетрясений энергетического класса $K > 10$, произошедшие за период МТ регистрации на пункте Укок-2; 2 – местоположение пунктов наблюдения; 3 – номера сейсмических событий; 4 – крупнейшие разломные структуры: ТФ – Таласо-Ферганский, ЛН – Линия Николаева, ЦТ – Центральнo-Терсkeyский, АИ – Атбаши-Иньльчекский, ГК – Гиссаро-Кокшаальский.

При этом в течение почти 3-х суточной регистрации МТ поля произошло 3 землетрясения энергетического класса $K > 10$ на территории Тяньшанского региона, которые были зарегистрированы различными сейсмическими сетями (рис. 3).

На рис. 4 в форме частотно-временных рядов показаны вариации кажущегося сопротивления в сопоставлении с вертикальной компонентой лунно-солнечных приливных воздействий (A_n) и распределением сейсмичности (3 землетрясения энергетического класса $K > 10$). Для расчета лунно-солнечных приливов использовалась программа TIDE_3.exe, с помощью которой можно рассчитать параметры лунно-солнечных приливных воздействий. В результате работы программы в файле TIDEALL.txt для каждого часа были получены 4 типа кривых приливных деформаций: восточная компонента (A_u), северная компонента (A_v), вертикальная составляющая (A_n), модуль полного вектора (A).

Из рис. 4 следует, что диапазон полученных изменений кажущегося сопротивления $\Delta\rho_k$ достаточно велик – от 20 до $-20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, принимая во внимание, что кривая ρ_k в пункте наблюдения находится на уровне первых сотен $\text{Ом} \cdot \text{м}$. Изменения кажущегося сопротивления в ортогональных направлениях для первых двух сейсмических событий происходят в нижней части разреза, для

третьего землетрясения – в средней части разреза. Отметим, что сейсмические события приурочены к градиентным зонам (зоны смены знака) вариаций кажущегося сопротивления. Наиболее отчетливо такие вариации выражены в верхней части разреза. Исходя из всего этого можно сделать вывод, что в вариациях электромагнитных параметров могут проявляться сейсмические события, случившиеся за 500 и более км от пункта наблюдения.

Анализ поведения вертикальной составляющей приливных деформаций A_n и распределения изменения кажущегося сопротивления $\Delta\rho_k$ (рис. 4), свидетельствует о том, что максимальной амплитуде вертикальной компоненты лунно-солнечных приливов (временные интервалы 04–22 и 25–44 ч записи) соответствует увеличение $\Delta\rho_k$ (максимум на $20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), а минимуму – уменьшение $\Delta\rho_k$. При этом все произошедшие землетрясения за рассматриваемый период наблюдения приурочены к минимуму лунно-солнечных приливов.

Таким образом, на основе результатов проведенного анализа МТ материалов пункта мониторинга Укок-2 в сопоставлении с лунно-солнечными приливами и сейсмичностью (рис. 4) можно отметить, что: 1) существует связь между вариациями кажущегося электросопротивления,

лунно-солнечными приливыми воздействиями и сейсмичностью; 2) существует приуроченность сейсмических событий к экстремумам лунно-солнечных приливов; 3) максимальной амплитуде вертикальной компоненты лунно-солнечных приливных воздействий соответствует увеличение ρ_k , а минимуму амплитуды – уменьшение ρ_k ; 4) наиболее четко вариации ρ_k , к которым приурочены инициированные взрывом сейсмические события, выражены в верхней части разреза на глубинах не более 10–15 км.

3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ПОЛЯРНЫЕ ДИАГРАММЫ МТЗ

Согласно существующей парадигме теории землетрясений, развиваемой в работах последователей Рейда [Reid, 1910], землетрясения возникают в зонах активных разломных структур. В связи с чем оценка отклика вариаций электропроводности на упругие деформации земной коры от лунно-солнечных приливных воздействий в зоне динамического влияния тектонических нарушений очень актуальна. Такие исследования позволяют определить тензочувствительные (индикаторные) пункты геофизических наблюдений, как наиболее подходящие для изучения современных геодинамических процессов, происходящих в сейсмоактивных регионах.

Для выбора таких наиболее чувствительных зон к изменению напряженно-деформированного состояния геосреды, где возможно установить наиболее устойчивую связь между вариациями электромагнитных параметров, упругих деформаций и распределением сейсмичности, можно использовать корреляционный анализ.

Временные ряды электромагнитных параметров, построенные по результатам мониторинговых наблюдений, анализируются на предмет определения вклада каждой из компонент тензора импеданса в информативность мониторинговых исследований. При этом рассматриваются как вариации реальных и мнимых компонент основных импедансов, фаз импедансов, кажущегося сопротивления, так и вариации дополнительных импедансов, которые, как оказалось, являются не менее информативными, чем остальные компоненты тензора импеданса. В результате корреляционного анализа, выполненного для пунктов МТ мониторинга, было установлено, что характер взаимосвязи наилучшим образом отображается с помощью корреляционных полярных диаграмм (рис. 5), где ось азимутов соответствует углу пересчета компонент тензора импеданса, по оси радиусов откладывается корень из периода зондирования, а значения коэффициентов корреляции показаны цветом.

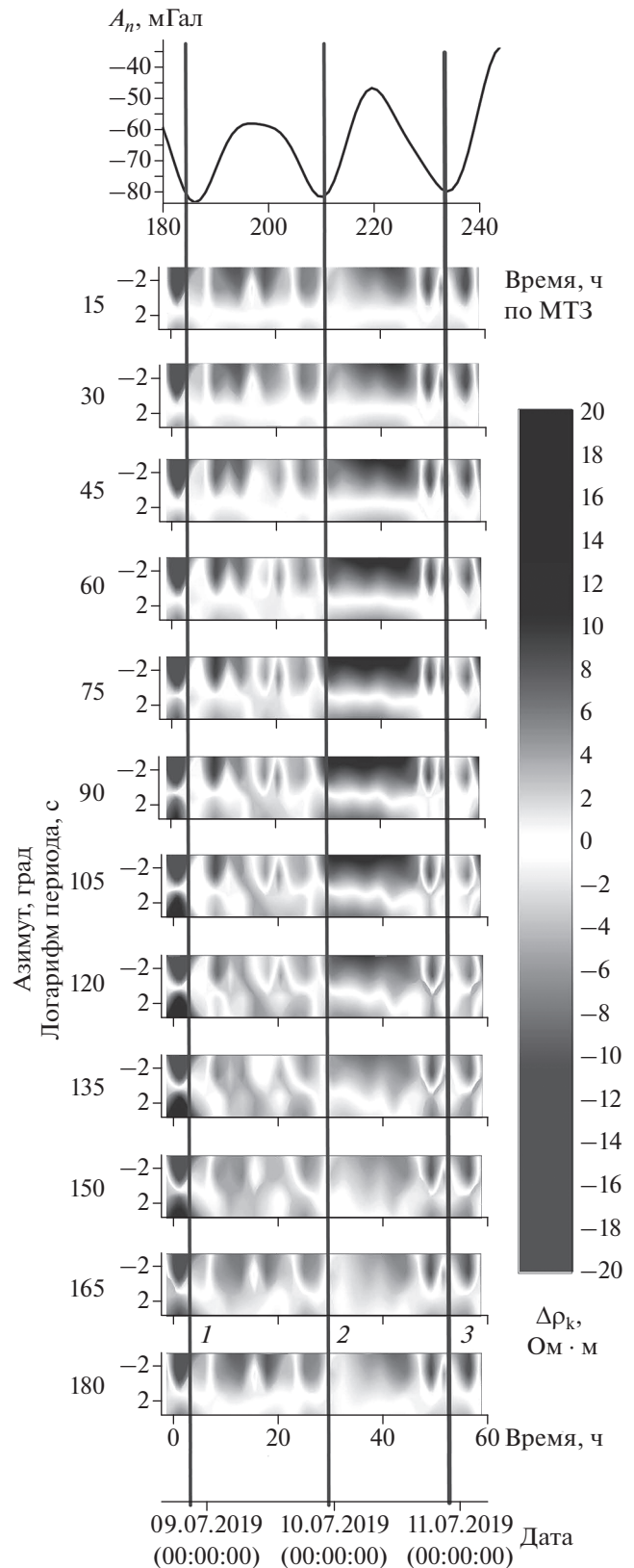


Рис. 4. Результат наблюдений на пункте Укок-2 08.07.2019–11.07.2019 гг. Верхний график – вертикальная компонента лунно-солнечных приливов, нижние разрезы – частотно-временные ряды МТЗ, построенные с шагом 15°. Вертикальными линиями отмечены произошедшие землетрясения.

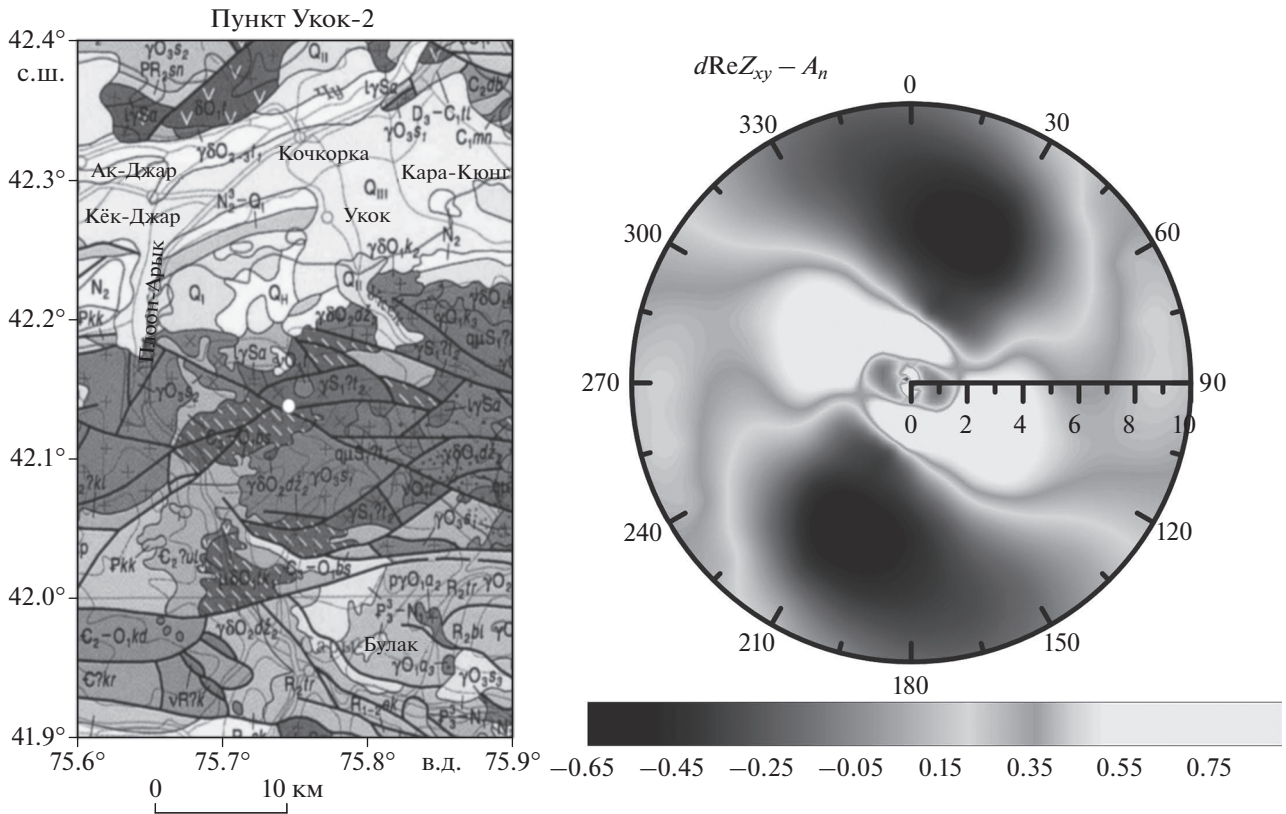


Рис. 5. Слева – фрагмент геологической карты вблизи расположения режимного пункта МТ мониторинга Укок-2 (белый кружок на карте); справа – полярная диаграмма: распределение коэффициента корреляции (основной импеданс Z_{xy} и вертикальная компонента приливных воздействий A_n) в полярных координатах, где по оси радиусов показан \sqrt{T} (T -период). Цвет (оттенки серого) показывает значения коэффициента корреляции.

Рассмотрим пример использования корреляционных полярных диаграмм для анализа результатов МТ наблюдений, полученные в пункте режимных наблюдений Укок-2. Непрерывная регистрация магнитотеллурического поля на этом пункте проводится в последнее время ежегодно в течение 20–21 дня, что позволяет устойчиво определить электромагнитные параметры и проследить их динамику в корреляции с гравитационными приливными воздействиями и распределением сейсмичности.

В построенной корреляционной полярной диаграмме для пункта Укок-2 (рис. 5) наблюдаются высокие коэффициенты корреляции для вариаций основного импеданса и вертикальной компоненты приливных воздействий A_n , их значения меняются от -0.65 до $+0.85$, что свидетельствует о высокой тензочувствительности пункта наблюдения. При сопоставлении диаграммы с геологической картой очевидно, что ориентация разлома, который находится в непосредственной близости от пункта зондирования Укок-2, соответствует положению кластеров на корреляционной полярной диаграмме.

Фактически, области (кластеры) устойчивой корреляции, которые выделяются на корреляционных полярных диаграммах, являются интегральной мерой взаимосвязи вариаций электромагнитных параметров с лунно-солнечными приливными воздействиями. Морфология и расположение кластеров (без учета знака) дают дополнительную характеристику деформационного процесса, проявления которого связаны с рассматриваемыми вариациями электромагнитных параметров среды. Также отметим, что положение кластеров на корреляционной полярной диаграмме пункта Укок-2 определяется геоэлектрической структурой пункта наблюдения и соответствует ориентации основных тектонических элементов вблизи этого пункта.

Таким образом, основным результатом МТ мониторинговых экспериментов, в частности пункта Укок-2, является получение оценки вариаций электромагнитных параметров как отклика среды на изменение напряженно-деформированного состояния среды, обусловленное как приливными воздействиями, так и сейсмическими событиями, произошедшими во время проведения экс-

перимента [Рыбин и др., 2011; Баталева и др., 2013; 2014; Баталева, 2016; Bataleva, 2019; Matiukov et al., 2021]. При этом геоэлектрическая структура пункта зондирования отражается в распределении устойчивых кластеров на корреляционных полярных диаграммах, а ориентация основных тектонических структур (вблизи пункта зондирования) соответствует положению кластеров на корреляционных полярных диаграммах.

4. ГЕНЕРАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭНДОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ НЕОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГЕОСРЕДЫ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Рассмотрим теоретические предпосылки изучения второй группы явлений, основанные на предположении о том, что необратимые деформации горных пород генерируют собственные источники электромагнитного излучения, что, в свою очередь, приводит к вариациям электромагнитного поля, которые можно наблюдать на поверхности Земли. Назовем такие вариации электромагнитным полем эндогенного (геодинамического) происхождения.

Процесс трещинообразования является мощным генератором собственного излучения Земли, поскольку каждая отдельная трещина создает наиболее мощный источник, как акустического, так и электромагнитного поля. Например, согласно работе [Шамина, Понятовская, 1993], средняя величина разности электрических потенциалов, возникающая в результате появления электрических зарядов на противоположных сторонах трещины при ее образовании, может достигать величины десятков киловольт.

Процесс трещинообразования проявляется в виде связанных событий – электромагнитном излучении (ЭМИ), сейсмоакустической эмиссии (САЭ) и механической деформации. Предполагается, что существует пространственно-временная дискретность источников, связанных с образованием и действием трещины как импульсного и точечного источника ЭМИ и САЭ. На этой основе сформулирована рабочая гипотеза о необратимых деформациях горной породы в процессе трещинообразования.

4.1. Рабочая гипотеза о необратимых деформациях горной породы в процессе трещинообразования

Основные положения этой гипотезы, которые базируются на представлении о пространственно-временной дискретности источников акустической эмиссии и электромагнитного излучения, сводятся к следующему [Александров, 2009]:

“1. Поля САЭ и ЭМИ являются суперпозицией полей элементарных источников. Последовательное появление в пространстве и во времени источников (источники появляются с временной задержкой в разных точках пространства и с разной амплитудой), непосредственно связано с появлением движущихся источников, скорость перемещения которых (имеется в виду эффективная) может весьма существенно влиять на формирование полей САЭ и ЭМИ.

2. Элементарный источник САЭ и ЭМИ связан с образующейся при разрушении трещиной. Каждая отдельная трещина создает наиболее мощный источник как акустического, так и электромагнитного поля.

3. Элементарные источники САЭ и ЭМИ – источники импульсного типа, в которых содержится широкий спектр частот.

4. Элементарные источники САЭ и ЭМИ связаны местоположением и ориентацией в пространстве.

5. Электромагнитные параметры среды за время одного сеанса наблюдения САЭ и ЭМИ не меняются.

6. Взаимодействие поля ЭМИ со сплошной средой подчиняется уравнениям Максвелла, САЭ – уравнениям теории упругости.”

В целом, рабочая гипотеза о генерации электромагнитного и сейсмического полей эндогенного происхождения сводится к следующему: при необратимых деформациях горной породы (трещинообразовании) в результате развития современных геодинамических процессов формируются источники эндогенных полей.

Отметим, что важным элементом гипотезы является фактор кажущегося движения, отмеченный в пункте 1 как “движущиеся источники”. Этот фактор оказывает существенное влияние на формирование электромагнитного и сейсмоакустического излучений эндогенного происхождения. Исследование различных аспектов вопроса “движущихся источников” представлено в работах [Alexandrov, 1997; Александров, 1999; Александров, Рыбин, 2021].

В рамках проверки рабочей математической модели рассматриваемой гипотезы получено решение прямой задачи геоэлектрики для слоистой модели геоэлектрической среды с распределенными в ней источниками электромагнитного поля в нижнем полупространстве [Александров, 2009]. С использованием программной реализации алгоритма, основанного на этом решении, проведен ряд модельных экспериментов по численным расчетам электромагнитного поля, генерируемого эндогенными источниками. В моделях рассматривалась область разрушения, связанная

с процессом трещинообразования, источники электромагнитного поля находились в области в виде шара. Источники моделировались электрическим диполем со случайным распределением их местоположения внутри области разрушения. Амплитуда и ориентация диполей также моделировалось случайным образом с помощью нормального распределения. Иначе говоря, все параметры источников, за исключением частоты, являлись случайными, распределенными по нормальному закону.

Результаты численного моделирования электромагнитного поля эндогенного происхождения со случайным распределением местоположения, амплитуды и направления электрических диполей показали, что при увеличении количества источников в единицу времени пространственная аномалия электромагнитного поля эндогенного происхождения сужается, а амплитуда напряженности электрического поля при этом увеличивается [Александров, 2009]. Т.е. с увеличением количества источников, появляющихся в единицу времени, происходит кажущийся процесс приближения области разрушения к земной поверхности и уменьшения размера этой области. Данный эффект связан с формированием движущегося источника и отражает переход совокупности источников в их новое качество. Для неподвижного источника этот эффект не наблюдается. Эти результаты моделирования подтверждают возможность получения информации о глубинных геодинамических процессах на основе анализа электромагнитного поля эндогенного происхождения.

4.2. Электромагнитное поле эндогенного происхождения и его энергетическая характеристика

Методика разделения электромагнитного поля по положению источников в методе МТЗ, детально описанная в работах [Alexandrov, 1997; Александров и др., 2018], позволяет выделить электромагнитное поле эндогенного происхождения из наблюдаемого поля. Рассмотрим этот методический подход.

Методика исходит из следующих утверждений. Пусть на поверхности Земли измеряются тангенциальные компоненты электромагнитного поля $\mathbf{X} = [H_x, H_y, E_x, E_y]^T$ стандартной магнитотеллурической установки. “Тогда электромагнитное поле, связанное с эндогенными источниками, в случае горизонтально-слоистой модели среды входит аддитивным образом в импедансные соотношения, связывающие тангенциальные компоненты электрического поля и тангенциальные компоненты магнитного поля на днев-

ной поверхности” [Александров и др., 2018]. Поэтому зная импеданс нижнего полупространства, можно получить компоненту наблюдаемого электромагнитного поля, связанную с эндогенными источниками электромагнитного поля, находящимися в нижнем полупространстве.

Ранее, в работах [Александров и др., 2018; Баталев и др., 2019] нами было введено математическое определение вектора электромагнитного поля эндогенного происхождения (\mathbf{Y}):

$$\mathbf{Y} = \mathbf{E}_0 - Z \cdot \mathbf{H}_0, \quad (1)$$

где: Z – импедансное соотношение для нижнего полупространства (рассчитанный как коэффициент пропорциональности), который не зависит от экзогенных источников электромагнитного поля; \mathbf{E}_0 – вектор измеренного электрического поля, \mathbf{H}_0 – вектор измеренного магнитного поля.

Это уравнение будет иметь место при любых источниках, находящихся в верхнем полупространстве и, соответственно, при любых параметрах слоистого (причем, необязательно слоистого) верхнего полупространства. По этому полю, зарегистрированному и вычисленному на дневной поверхности, можно определить местоположение области разрушения горной породы и дать количественную оценку интенсивности этих процессов.

По аналогии с энергетическим вкладом, рассчитываемым через площадь под графиком, нами в работе [Александров и др., 2018] было введено математическое определение энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения $\int_0^{\Delta W} |\mathbf{Y}(\omega)| d\omega$ как интеграла по частоте ω в Гц от модуля вектора \mathbf{Y} .

Таким образом, этот параметр позволяет интегрально охарактеризовать интенсивность выделенных компонент электромагнитного поля эндогенного происхождения. Для вычисления непрерывная запись сессии измерений электромагнитного поля подвергается разделению на одночасовые сегменты. Затем по первому часу записи электромагнитного поля определяется магнитотеллурический импеданс Z , как коэффициент пропорциональности, который используется далее для обработки данных МТЗ по каждому последующему часу записи. Вычисление энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения – вектора

$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} Y_x \\ Y_y \end{pmatrix}$, ведется через численное определение сглаженных значений компонент Y_x и Y_y по формуле, $|\mathbf{Y}| = \sqrt{|Y_x|^2 + |Y_y|^2}$. Результаты расчетов энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения в частотно-

временной области будут проиллюстрированы ниже в разделе 5.

5. ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛИТОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭНДОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим практические примеры применения разработанной методики наблюдения современных геодинамических процессов в сейсмоактивных районах Северного Тянь-Шаня с использованием электромагнитного поля эндогенного происхождения [Непеина, 2021]. Для получения электромагнитного поля эндогенного происхождения используются данные регистрации МТЗ и программа математической обработки полевых записей МТЗ по разделению электромагнитного поля по положению источников с целью выделения составляющей электромагнитного поля эндогенного происхождения [Александров, Баталева, 2019].

5.1. Накопление массива энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного происхождения по результатам магнитотеллурических наблюдений на территории Северного Тянь-Шаня

Были рассчитаны энергетические характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения для большого набора временных рядов электромагнитных измерений, выполненных за последние годы в пунктах режимных и мониторинговых магнитотеллурических наблюдений на территории Северного Тянь-Шаня [Непеина, 2021].

Рассмотрим некоторые примеры выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения с использованием мониторинговых данных, полученных на режимных пунктах глубинного магнитотеллурического зондирования ГМТЗ на территории Северного Тянь-Шаня. В результате обработки полевых записей было выделено электромагнитное поле эндогенного происхождения и построено трехмерное распределение среднеамплитудных значений электромагнитного поля эндогенного происхождения в частотно-временной области для этих пунктов. Примеры такой обработки для пунктов ГМТЗ 901 и 902 приведены на рис. 6 (трехмерное распределение). И соответствующие энергетической характеристики по всему диапазону частот для электромагнитного поля эндогенного происхождения на тех же пунктах показаны на рис. 7.

5.2. Выявление причинно-следственной связи энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного происхождения с лунно-солнечными приливами

Проведено сопоставление полученных энергетических характеристик наблюдаемых полей эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов для отдельных пунктов ГМТЗ.

Отметим, что в вариациях энергетических характеристик прослеживаются периодические составляющие (рис. 7). Следует предположить, что имеет место возможная связь таких вариаций с лунно-солнечными приливами. Поэтому было проведено сопоставление энергетической характеристики выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов в программе TIDE_3.exe и вычислено время задержки, определенное по всем частотам. Данное сопоставление выполнено с помощью созданных для этих целей программ [Александров, Баталева, 2019].

Наиболее подходящим инструментом для вычисления и изображения такой зависимости между двумя функциями для переходных процессов и определения времени задержки является функция взаимной корреляции (ФВК). ФВК представляет собой интегральное произведение двух процессов (по аналогии с интегралом Дюамеля), взятых в разные моменты времени:

$$R_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(\tau) f_2(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где: f_1 – численный ряд, представляющий энергетическую характеристику поля эндогенного происхождения; f_2 – изменения лунно-солнечных приливов для того же отрезка времени; t – текущий момент времени наблюдений. “Время задержки отражает время реакции среды на внешнее воздействие. Если такая ФВК представляет собой нечетную функцию, то становится явным, что является причиной, а что следствием. Метод расчета ФВК в виде (2) позволяет обнаружить отклик линейных пассивных систем на произвольно меняющийся во времени входной сигнал” [Непеина, 2021]. Для проверки функциональной зависимости между энергетической характеристикой выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения для 3-х суточной полевой записи пункта ГМТЗ 901 с параметрами лунно-солнечных приливов проведено сопоставление по формуле (2) и получены следующие графики (рис. 8).

Путем анализа рис. 8 (нижний график) однопараметрическая корреляционная функция для определенного периода ($T = 1$ с) является нечетной. Получается, что временная задержка отно-

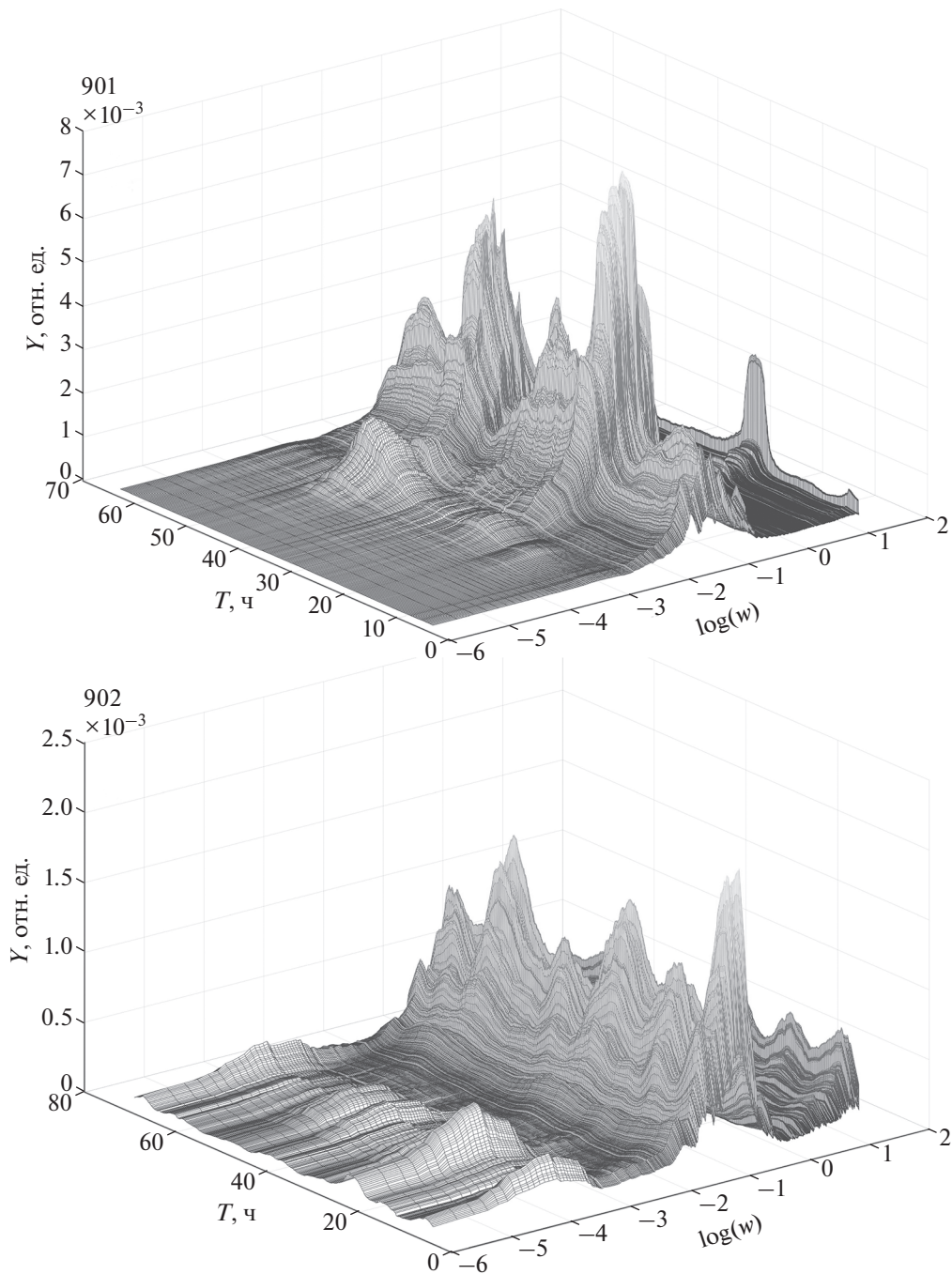


Рис. 6. Трехмерное распределение среднеамплитудных значений электромагнитного поля эндогенного происхождения в частотно-временной области для пунктов ГМТЗ 901 (верхняя часть рисунка) и 902 (нижняя часть рисунка).

сительно нуля свидетельствует о причинно-следственной связи между двумя процессами. В работе [Баталев и др., 2019] было показано, что для пункта ГМТЗ 901 время реакции среды (задержки), полученное по всем частотам, составило 2.2 ч (рис. 9). Соответственно, “сначала меняются лунно-солнечные приливы, а затем, через 2.2 ч меня-

ется энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения” [Баталев и др., 2019].

Таким образом, установлена причинно-следственная связь энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного происхождения с лунно-солнечными приливами в отдель-

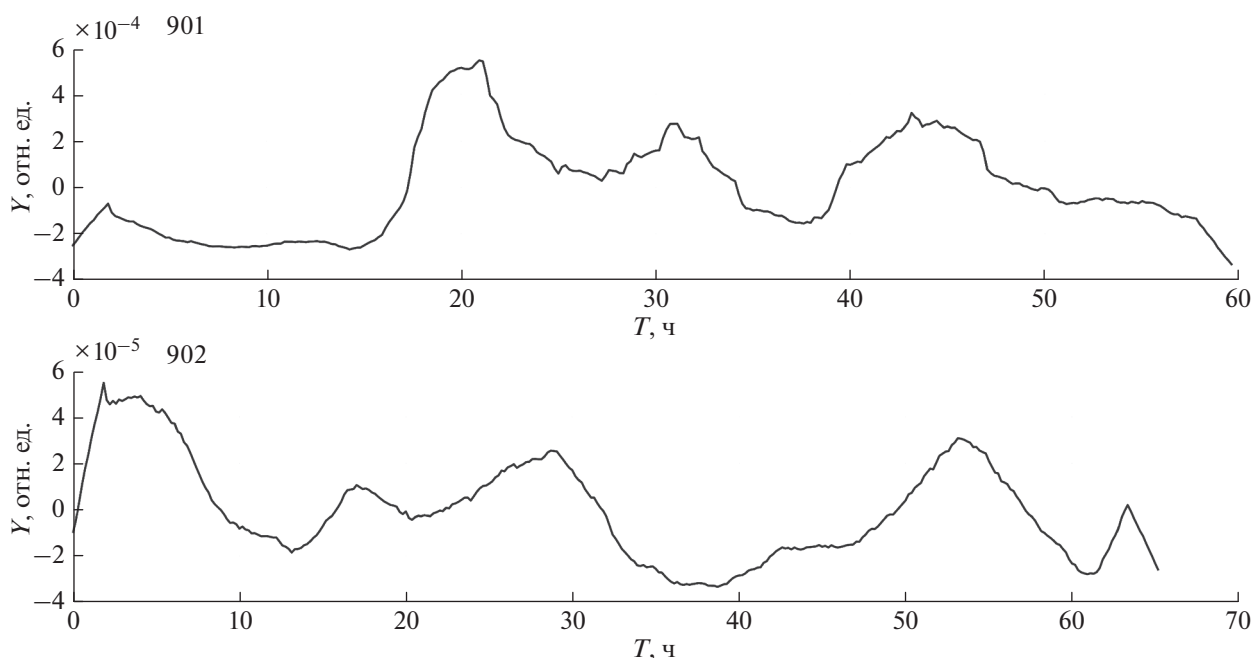


Рис. 7. Энергетические характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения для пунктов ГМТЗ 901 и 902.

ных районах на территории Северного Тянь-Шаня. Вычисленная при этом функция взаимной корреляции свидетельствует в пользу того, что найдена связь геодинамической активности литосферы как отклик на приливные деформации с различными временами задержки для разных пунктов наблюдений.

6. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены различные аспекты фундаментальной проблемы изучения современных геодинамических процессов литосферы активных регионов с использованием электромагнитных полей, на примере Тянь-Шаня. Приведены примеры практической реализации двух направлений исследований: (1) слежение за временной динамикой свойств геоэлектрического разреза и (2) изучение полей эндогенного (геодинамического) происхождения.

Представленные в статье результаты по изучению динамики свойств геоэлектрического разреза сейсмоактивных районов Тянь-Шаня основаны на анализе обширного массива данных магнитотеллурических и магнитовариационных наблюдений. Этот массив включает в себя материалы этих наблюдений, которые осуществляются уже 40 лет на территории Тяньшанского региона в рамках функционирования геофизиче-

ского полигона Научной станции РАН. Основные результаты в этом направлении исследований:

- экспериментальное подтверждение факта взаимосвязи вариаций электрического сопротивления с изменением напряженно-деформированного состояния участков земной коры Тянь-Шаня, полученное с использованием разработанной в Научной станции РАН методики азимутального магнитотеллурического мониторинга;

- выделение направлений максимальных и минимальных изменений кажущихся электросопротивлений, предположительно соответствующих осям сжатия и растяжения, по результатам анализа частотно-временных рядов азимутального магнитотеллурического мониторинга;

- разработка методики количественной оценки отклика вариаций электропроводности на упругие деформации земной коры от лунно-солнечных приливных воздействий на основе построения и анализа корреляционных полярных диаграмм.

По второму направлению, связанному с использованием ЭМ полей эндогенного происхождения, в развитие идей Б.С. Светова и его последователей, в последние годы сделаны реальные практические шаги, которые рассмотрены в разделах второй части нашей статьи. Основные результаты в этом направлении исследований:

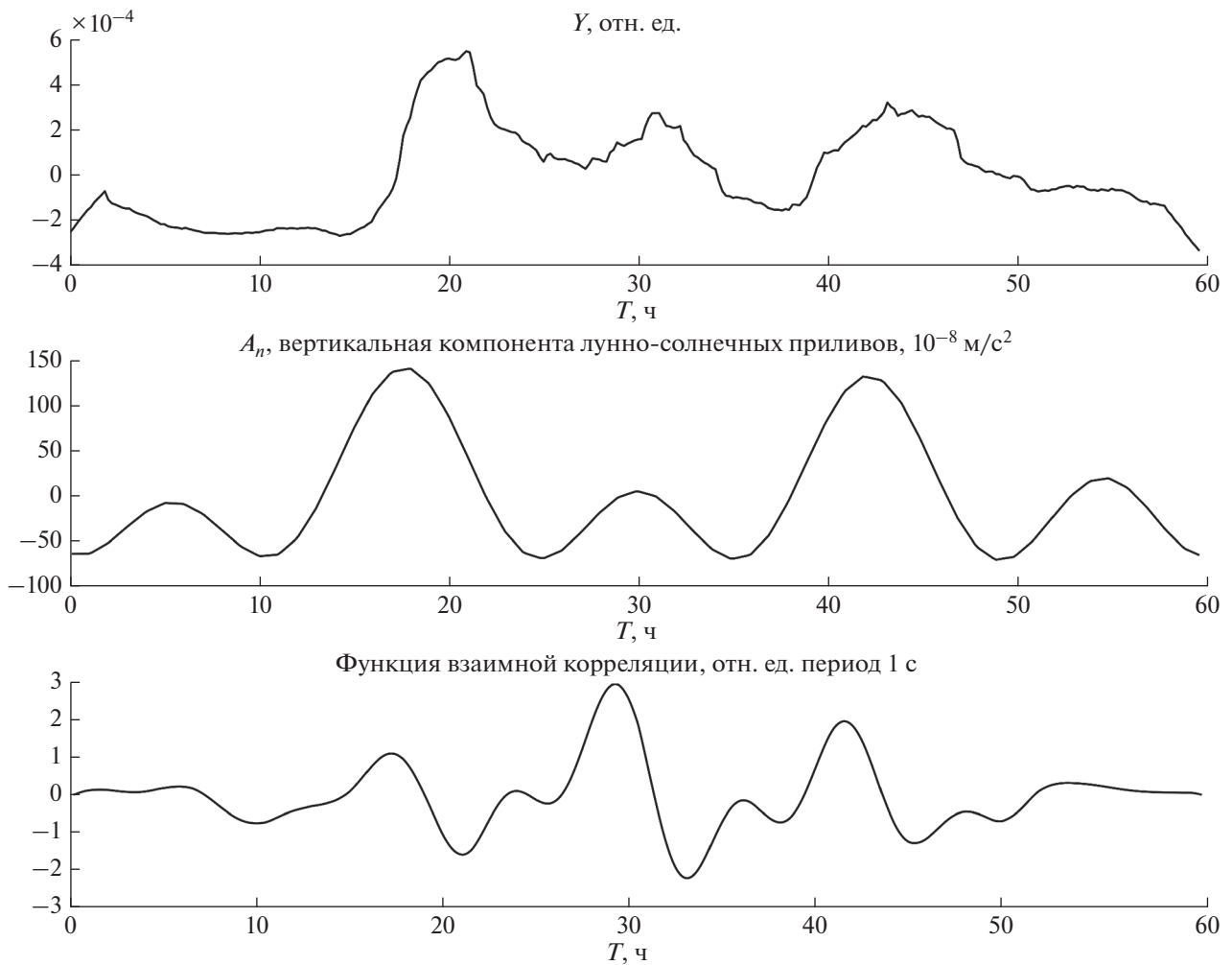


Рис. 8. Результаты вычисления на пункте ГМТЗ 901: энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения (верхний график); вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n (средний график) для периода $T = 1$ с; функция их взаимной корреляции (нижний график).

– разработка и апробация методики разделения электромагнитного поля по положению источников в методе МТЗ для выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения из наблюдаемого поля;

– расчет энергетической характеристики этого поля для большого набора временных рядов электромагнитных измерений, выполненных за последние годы в пунктах магнитотеллурических наблюдений на территории Северного Тянь-Шаня;

– установление причинно-следственной связи энергетических характеристик электромагнитного поля эндогенного происхождения с лунно-солнечными приливами в отдельных районах исследуемого региона.

Дополнительно отметим важность вопроса о частотном диапазоне ЭМ исследований, направленных на изучение современных геодинамиче-

ских процессов. На этот аспект также указывал Б.С. Светов [Светов, 1992; Светов и др., 1997]. Из общих представлений можно предположить, что спектральный состав электромагнитных полей внутреннего (геодинамического) происхождения в первом приближении зависит от вида деформаций горного массива (упругих, пластически разрушающих). Генерируемое при медленных деформациях электромагнитное поле, по-видимому, охватывает низкочастотный диапазон от квазипостоянного поля до первых десятков герц. В случае необратимых (разрушающих) деформаций спектральный состав генерируемого электромагнитного поля расширяется в область высоких частот (до первых десятков килогерц и выше). В настоящей работе представлены результаты по упомянутому выше двум направлениям исследований, полученные на основе анализа электромагнитных полей в низкочастотном (магнитотел-

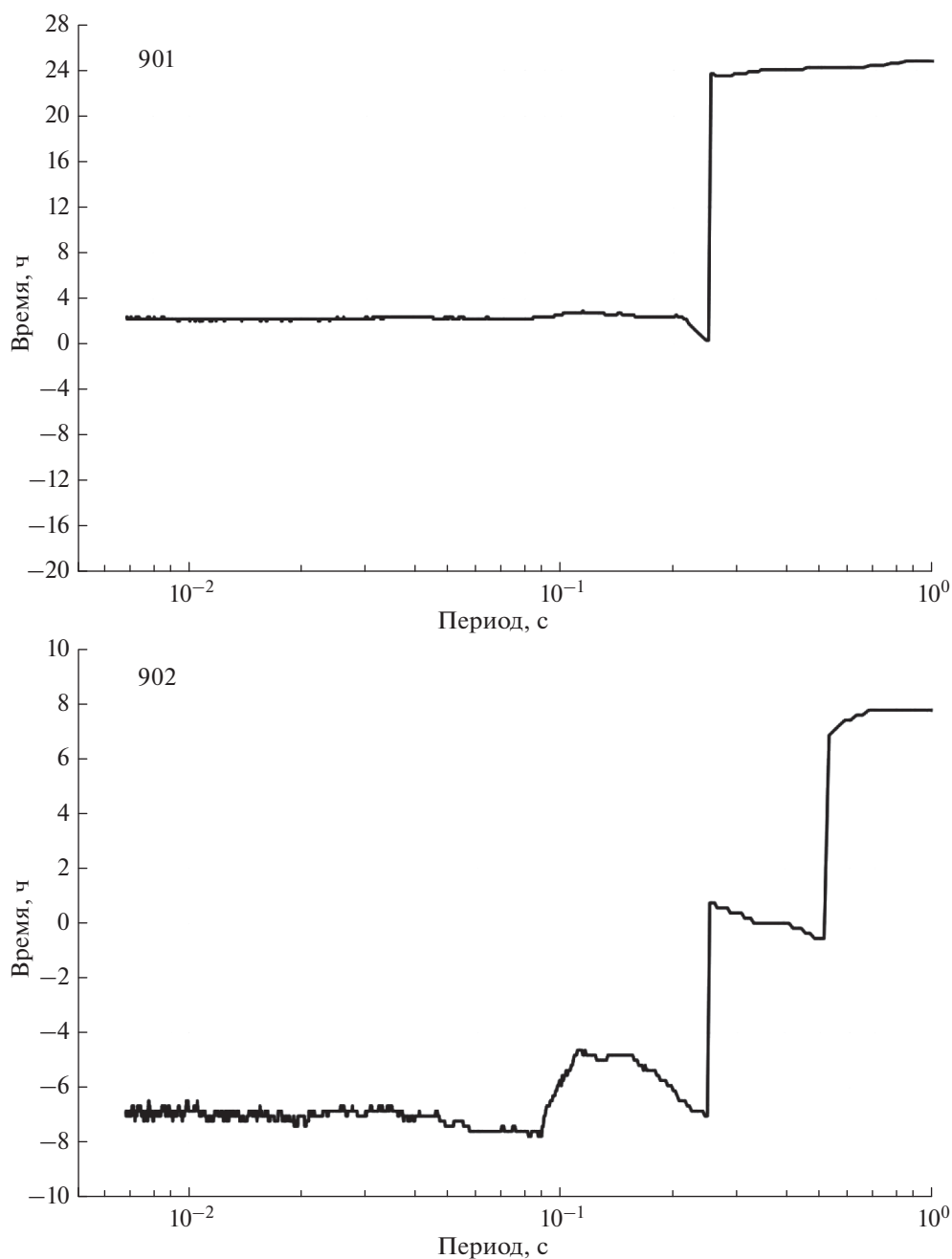


Рис. 9. Время реакции среды на внешнее воздействие (лунно-солнечных приливов), вычисленное по всем периодам/частотам для пунктов GMT3 901 и 902.

лурическом) диапазоне, наиболее интересном для нас с точки зрения поведения во времени геоэлектрического разреза среды. Поэтому перспективным шагом в развитии электромагнитных исследований современной геодинамики Тянь-Шаня мы считаем начатый в Научной станции РАН эксперимент по изучению электромагнитного поля эндогенного происхождения в килогерцовом диапазоне частот, где, возможно, будут преобладать вариации электромагнитного поля,

вызванные необратимыми деформациями геосреды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Результаты, описанные в разделах 2–3, получены в рамках выполнения Государственного задания НС РАН – тема “Изучение глубинного строения и современной геодинамики литосферы Тянь-Шаня и окружающих областей по комплексу геофизических мето-

дов” (регистрационный номер темы в системе ЕГИСУ НИОКТР АААА-А20-120102190009-9).

Результаты, представленные в разделах 4–5, получены в ходе выполнения проектов РФФИ № 17-05-00844 “Изучение современных геодинамических процессов сейсмоактивных регионов методом магнитотеллурического зондирования (на примере Тянь-Шаня)” и № 20-05-00475 “Теория и практика создания системы сейсмоэлектромагнитного мониторинга геодинамической активности литосферы Тянь-Шаня”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность старшему научному сотруднику ИС РАН Матюкову В.Е. за помощь в подготовке иллюстративных материалов и коллегам полевой группы ГМТЗ Научной станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б.* О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // *Физика Земли*. 2005. № 6. С. 55–65.
- Александров П.Н., Баталева Е.А.* Программа разделения электромагнитного поля по положению источников по данным магнитотеллурических зондирования. Свидетельство о гос. регистр. прог. ЭВМ № 2019618606. Российская Федерация. Опубл. 02.07.2019.
- Александров П.Н.* К теории сейсмического и электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2009. № 2(14). С. 49–58.
- Александров П.Н.* Развитие теории геоэлектрики в анизотропных и бианизотропных средах. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М. 1999. 39 с.
- Александров П.Н., Модин И.Н.* О системном подходе к анализу данных электрометрического мониторинга // *Инженерные изыскания*. 2015. № 3. С. 42–50.
- Александров П.Н., Рыбин А.К.* Феномен поля источников электромагнитной эмиссии в земле – эффект Доплера в проводящей среде. Матер. VIII Всеросс. школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна, Москва, 04–07 октября 2021 года. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2021. С. 331–336.
- Александров П.Н., Рыбин А.К., Забиякова О.Б.* Разделение электромагнитного поля по положению источников в методе МТЗ // *Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки*. 2018. Т. 160. № 2. С. 339–351.
- Барсуков О.М., Сорокин О.Н.* Изменение кажущегося сопротивления горных пород в Гармском сейсмоактивном районе // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1973. № 10. С. 100–102.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е., Рыбин А.К.* Изучение необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня по магнитотеллурическим данным (методологический аспект) // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2019. № 2(42). С. 42–56. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-2-42-42-56>
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К., Александров П.Н., Матюков В.Е., Непеина К.С., Забиякова О.Б., Казначеев П.А.* Теоретические обоснования исследований деформационных процессов в литосфере Земли на основе сейсмических и электромагнитных полей эндогенного происхождения. Математическое моделирование процессов и систем. Коллективная монография по материалам пленарных докладов VIII Международной молодежной научно-практической конференции 4–7 октября 2018 г. Ч. I / С.А. Мустафина (отв. ред.). Стерлитамак: Стерлитамакский филиал БашГУ. 2018. С. 95–122.
- Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Рыбин А.К., Александров П.Н., Матюков В.Е., Забиякова О.Б.* Разделение магнитотеллурического поля на экзогенную и эндогенную составляющие. Первые практические результаты. Материалы IV Школы – семинара “Гординские чтения”. М.: ИФЗ РАН. 2017. С. 25–29.
- Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Голланд М.Л., Голубцова Н.С., Кузнецов В.А.* Интерпретация глубинных магнитотеллурических зондирований в Чуйской межгорной впадине // *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*. 1989. № 9. С. 42–45.
- Баталева Е.А.* Корреляционные зависимости электромагнитных и деформационных параметров // *Докл. РАН*. 2016. Т. 468. № 3. С. 319–322.
- Баталева Е.А., Баталев В.Ю.* Анализ результатов Камбаратинского эксперимента с привлечением методики синхронных измерений // *Вестник КРСУ*. 2017. Т. 17. № 1. С. 181–184.
- 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. 105–113.
- Баталева Е.А., Рыбин А.К., Баталев В.Ю.* Вариации кажущегося сопротивления горных пород как индикатор напряженного состояния среды // *Геофизические исследования*. 2014. Т. 15. № 4. С. 53–64.
- Беляков А.С., Лавров В.С., Николаев А.В.* Сейсмоакустический шум Земли // *Геология и геофизика Юга России*. 2016. № 4. С. 10–19.
- Бердичевский М.Н., Дмитриев В.И., Новиков Д.Б., Пастушан В.В.* Анализ и интерпретация магнитотеллурических данных. М.: Диалог-МГУ. 1997. 161 с.
- Брагин В.Д.* Сейсмические исследования эффектов, обусловленных мощным промышленным взрывом в районе Нарынского каскада гидроэлектростанций (Камбарата) // *Вестник КРСУ*. 2011. Т. 11. № 4. С. 97–103.
- Гершензон Н.И., Зилпимиани Д.О., Манджгаладзе П.В., Похотелов О.А., Челидзе З.Т.* Электромагнитное излучение вершины трещины при разрушении ионных кристаллов // *Докл. АН СССР*. 1986. Т. 22. № 1. С. 75–78.
- Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмоэлектромагнитные явления. М.: Наука. 1988. 175 с.
- Жамалетдинов А.А., Митрофанов Ф.П., Токарев А.Д., Шевцов А.Н.* Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры // *Докл. РАН*. 2000. Т. 37. № 2. С. 235–239.

- Жуков В.С., Кузьмин Ю.О., Салов Б.Г. Деформации и трещинообразование в образцах горных пород при длительном воздействии постоянных сжимающих напряжений. Модельные и натурные исследования очагов землетрясений. М.: Наука. 1991. С. 156–162.
- Крылов С.М., Никифорова Н.Н. О сверхнизкочастотном электромагнитном излучении активной геологической среды // Физика Земли. 1995. № 6. С. 42–57.
- Куликов В.И., Эткин М.Б. Сейсмическое действие Камбаратинского взрыва // Взрывное дело. 2013. № 110-67. С. 147–164.
- Курленя М.В., Вострецов А.Г., Кулаков Г.И., Яковицкая Г.Е. О прогнозе разрушения горных пород на основе регистрации импульсов электромагнитного излучения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2001. № 3. С. 12–18.
- Майбук З.-Ю.Я., Крылов С.М., Никифорова Н.Н. Электромагнитный мониторинг тектонической активности на основе динамического тектономагнитного эффекта // Геофизика. 2000. № 5. С. 44–48.
- Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир. 1968. 482 с.
- Модин И.Н., Макаров Д.В., Александров П.Н. Возможности электротомографических станций при выполнении мониторинговых наблюдений // Инженерные изыскания. 2014. № 9–10. С. 22–31.
- Муратов П.В., Руленко О.П., Маратулец Ю.В., Солодчук А.А. Электрический и акустический отклик приповерхностных осадочных пород на прохождение сейсмических волн от землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. н. 2018. № 5(25). С. 62–73. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-62-73>
- Неведрова Н.Н., Пономарев П.В. Результаты многолетнего мониторинга электрофизических параметров в сейсмоактивной зоне горного Алтая методами постоянного тока // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 3. С. 281–287. <https://doi.org/10.18303/2618-981X-2018-3-281-287>
- Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической активизации Горного Алтая // Геофизика. 2015. № 1. С. 31–40.
- Непешина К.С. Сейсмoeлектромагнитный мониторинг современных геодинамических процессов литосферы Северного Тянь-Шаня. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова. 2021. 134 с.
- Проблемы нелинейной сейсмологии / А.В. Николаев, И.Н. Галкин (отв. ред.) М.: Наука. 1987. 287 с.
- Рыбин А.К., Баталев В.Ю., Ильичев П.В., Щелочков Г.Г. Магнитотеллурические и магнитовариационные исследования Киргизского Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1566–1173.
- Рыбин А.К., Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 29–40.
- Рыбин А.К., Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Матюков В.Е. Вариации электросопротивления земной коры по результатам магнитотеллурического мониторинга сейсмоактивных зон Тянь-Шаня // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 4. С. 29–40.
- Рыбин А.К., Пушкарев П.Ю., Паленов А.Ю., Иванова К.А., Мансуров А.Н., Матюков В.Е. Новые геофизические данные о глубинной структуре межгорных впадин Тянь-Шаня // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2015. № 1. С. 63–69.
- Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 5. С. 445–460.
- Рыбин А.К., Спичак В.В., Баталев В.Ю., Баталева Е.А., Матюков В.Е. Магнитотеллурические зондирования в сейсмоактивной зоне Северного Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 5. С. 445–460.
- Светов Б.С. Электромагнитный мониторинг сейсмo-тектонических процессов // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 1992. № 2. С. 99–116.
- Светов Б.С., Каринский С.Д., Кукса Ю.И., Одинцов В.И. Магнитотеллурический мониторинг геодинамических процессов // Физика Земли. 1997. № 5. С. 36–46.
- Соболев Г.А. Динамика разрывообразования и сейсмичность // Тектонофизика сегодня. М.: ОИФЗ РАН. 2002. С. 67–78.
- Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений / Отв. ред. А.В. Николаев. М.: МАИК “Наука/Интерпериодика”. 1993. 313 с.
- Соболев Г.А., Майбук З.-Ю.Я. Вызванное электромагнитное излучение горных пород, содержащих минералы-полупроводники // Докл. РАН. Науки о Земле. 2013. Т. 453. № 1. С. 92–94.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Майбук З.-Ю.Я. Иницирование неустойчивых подвижек – микроземлетрясений упругими импульсами // Физика Земли. 2016. № 5. С. 51–69. <https://doi.org/10.7868/S0002333716050136>
- Трапезников Ю.А., Андреева Е.В., Баталев В.Ю., Бердичевский М.Н., Ваньян Л.Л., Вольхин А.М., Голубцова Н.С., Рыбин А.К. Магнитотеллурическое зондирование в горах Киргизского Тянь-Шаня // Физика Земли. 1997. № 1. С. 3–20.
- Уваров В.Н., Ларионов И.А., Малкин Е.И. Электромагнитные проявления активной земной коры // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. н. 2018. № 5(25). С. 115–129. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-115-129>
- Шамина О.Г., Понятовская В.И. Модельные исследования неоднородных и трещиноватых сред. М.: ИФЗ РАН. 1993. 179 с.
- Alexandrov P.N. Mathematical model of electromagnetic field emission taking into account motion of the source // J. Earthquake Prediction Research. 1997. V. 6. № 4. P. 560–571.
- Bataleva E.A. On the question of the relationship of variations of geophysical fields, lunar-solar tidal effects and seismic events. X Anniversary International Conference “Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors”. E3S Web of Conferences. 2019. 127. 02019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912702019>
- Bataleva E.A. Processing, analysis and interpretation of time-frequency series for magnetotelluric monitoring. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 350. 115. 012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/350/1/012053>
- Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A. Complex electromagnetic monitoring of geodynamic processes in the Northern Tien Shan (Bishkek Geodynamic Test Area) // Geodynam-

ics & Tectonophysics. 2018. V. 9(2). P. 461–487. (In Russ.)
<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>

Bogomolov L., Bragin V., Fridman A., Makarov V., Sobolev G., Polyachenko E., Schelochkov G., Zeigarnik V., Zubovich A. Comparative analysis of GPS, seismic and electromagnetic data on the Central Tien Shan Territory // *Tectonophysics*. 2007. V. 431. P. 143–151.
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.043>

Bragin V.D., Schelochkov G.G., Zeigarnik V.A. Study of the Earth's Crust Deformation Distribution at the Territory of Bishkek Prognostic Proving Ground by Electromagnetic Methods. World Conference on Disaster Reduction, 18–22 January 2005. Kobe. Hyogo. Japan. www.unisdr.org/wcdr

Chikov B.M. Problems of geological interpretation of seismic-foci systems of the Earth's crust (geomechanics and tectonophysical analysis) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2010. V. 1. № 3. P. 231–248.
<https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-3-0019>

Davidsen J., Kwiatek G., Charalampidou E., Goebel T., Stanchits S., Rück M., Dresen G. Triggering Process in Rock Fracture // *Phys. Rev. Lett.* 2017. V. 119. P. 068501.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.068501>

Longman I.M. Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun // *J. Geophys. Res.* 1959. V. 64. № 12. P. 2351–2355.

Matiukov V.E., Bataleva E.A., Nepeina K.S. New options to study irreversible deformations in the Tien Shan lithosphere // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 773. № 117. P. 012053.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/773/1/012053>

Moroz Yu.F., Gontovaya L.I. Deep structure of South Kamchatka according to geophysical data // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2018. V. 9(4). P. 1147–1161. (In Russ.)
<https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-4-0387>

Reid H.F. Mechanics of the earthquake, the California Earthquake of April 18, 1906. Report of the State Investigation Commission. Washington DC. 1910. Carnegie Institution of Washington.

Rybin A., Bataleva E., Nepeina K., Matiukov V., Alexandrov P., Kaznacheev P. Response of cracking processes in variations of geophysical fields // *J. Applied Geophysics*. 2020. P. 104144.
<https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104144>

Electromagnetic Studies of the Present-Day Geodynamic Processes in the Lithospheres of the Regions of Intracontinental Orogeny: The Tien Shan Case Study

A. K. Rybin^{a, *}, E. A. Bataleva^a, P. N. Aleksandrov^{b, **}, and K. S. Nepeina^a

^aResearch Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek, Bishkek, Kyrgyzstan

^bGeoelectromagnetic Research Center, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

*e-mail: rybin99@yandex.ru

**e-mail: alexandr@igemi.troitsk.ru

Electromagnetic studies of the dynamics of the stress-strain state of the geological medium are based on the analysis of two groups of physical phenomena. The first group includes phenomena associated with the dynamics of electrical properties of rocks under the change in their fracturing, porosity, fluid content, structure and texture, temperature and pressure, etc. The second groups of the phenomena is related to the generation of the sources of electromagnetic field of endogenous (geodynamic) origin during irreversible deformations of the geological medium. In this paper, we present the practical results of the studies of natural electromagnetic field of the Earth aimed at investigating the present geodynamics of the Tien Shan lithosphere, which were accumulated over the 40-year period of operation of the Bishkek geodynamic test site at the Research Station of the Russian Academy of Sciences in Bishkek. The experimental results of the study of the first group of phenomena are based on the analysis of temporal changes in the magnetotelluric transfer functions. In the analysis it is assumed that the present-day geodynamic processes including the catastrophic ones such as earthquakes are a trigger for the processes of fracturing, which, in turn, leads to the changes in the pore-fracture space of rocks and fluid redistribution in them, and, thus, to the changes in the electrical conductivity of the geological medium. The practical results of the study of the second group of phenomena are based on the notion that the present geodynamic processes that occur in the Earth's crust of the Tien Shan due to the irreversible deformations of rocks form the sources of electromagnetic radiation, leading to the variations in the endogenous electromagnetic field which can be observed on the Earth's surface.

Keywords: magnetotelluric sounding, apparent electrical resistivity, irreversible deformations, endogenous electromagnetic field, energy characteristic, present geodynamic processes, Tian Shan orogen