



**О НОВЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ В ИЗУЧЕНИИ НЕОБРАТИМЫХ ДЕФОРМАЦИЙ
ЛИТОСФЕРЫ ТЯНЬ-ШАНЯ**

В. Е. Матюков, Е. А. Баталева, К. С. Непейна

*Научная станция РАН, E-mail: vitaliy@gdirc.ru, ИС РАН,
г. Бишкек 720049, Киргизская Республика*

Применен подход, согласно которому электромагнитное поле эндогенного происхождения входит в импедансные соотношения аддитивным образом, что позволяет разделить электромагнитное поле, зарегистрированное на дневной поверхности, по положению источников. Представлены практические примеры выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения в полевых записях магнитотеллурических зондирований, выполненных в Тянь-шанском регионе. Проведено сопоставление характеристик выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов и анизотропными свойствами электрического сопротивления. Выявленные взаимосвязи этих параметров указывают о новых возможностях изучения необратимых деформаций в литосфере Тянь-Шаня с использованием магнитотеллурических данных.

Анизотропия электрического сопротивления, необратимые деформации, магнитотеллурические поля, естественное напряженное состояние, Тянь-Шань

**ABOUT NEW POSSIBILITIES IN STUDYING PERMANENT DEFORMATIONS
IN TIEN SHAN LITHOSPHERE**

V. E. Matyukov, E. A. Bataleva, and K. S. Nepeina

*Research Station of Russian Academy of Sciences,
E-mail: vitaliy@gdirc.ru, Bishkek 720049, Kyrgyzstan*

An approach has been applied, according to which the electromagnetic field of endogenous origin is included in the impedance relations in an additive way, which allows to separate the electromagnetic field recorded on the day surface in compliance with the position of sources. Practical examples of distinguishing an electromagnetic field of endogenous origin in field recordings of magnetotelluric soundings performed in the Tien Shan region are presented. The characteristics of the distinguished electromagnetic field of endogenous origin are compared with the parameters of lunar-solar tides and anisotropic properties of electrical resistance. The detected relationships of these parameters indicate new possibilities for studying permanent deformations in the Tien Shan lithosphere using magnetotelluric data.

Electrical resistance anisotropy, permanent deformations, magnetotelluric fields, natural stress state, Tien Shan

Цель работы — развитие методики изучения напряженно-деформированного состояния геологической среды в условиях субмеридионального сжатия. Мощным импульсом для этого послужило проведение Камбаратинского эксперимента (22 декабря 2009 г.), который включал в себя сейсмологические, электромагнитные и GPS-наблюдения (рис. 1). Расстояние от пункта взрыва до магнитотеллурической (МТ) станции Феникс MTU-5D равнялось 5.7 км. Мощность

промышленного взрыва составляла 2.8 кт в тротиловом эквиваленте. Камбаратинский взрыв вследствие своей мощности явился неординарным сейсмическим событием, сопоставимым по сейсмическому эффекту с подземными ядерными взрывами и тектоническими землетрясениями, и зарегистрирован как землетрясение 30-ю сейсмическими станциями мира. Полученные в эксперименте сейсмические данные позволили установить наличие обусловленных взрывом подвижек по разлому, прилегающему к пункту взрыва. Кроме этого, зафиксирована серия наведенных слабых сейсмических событий на расстоянии около 16 км от пункта взрыва, произошедших через 12 с после взрыва. Сам взрыв и наведенные им землетрясения четко проявились в частотно-временных рядах (рис. 2).

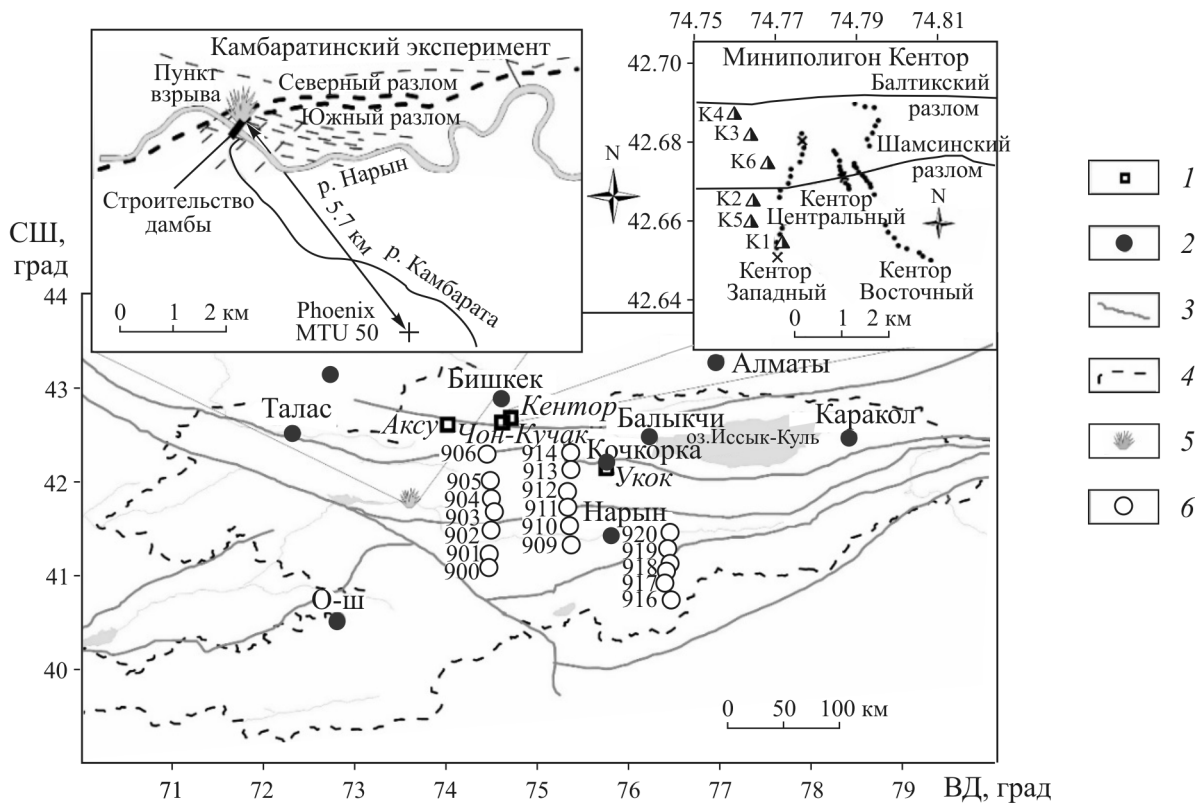


Рис. 1. Карта-схема Центрального Тянь-Шаня с расположением стационарных и режимных пунктов и пунктов ГМТЗ Научной станции РАН в г. Бишкеке, а также Камбаратинского эксперимента: 1 — стационарные пункты Ак-Суу и Чон-Курчак, миниполигон Кентор и пункт режимного мониторинга Укок; 2 — основные населенные пункты; 3 — разломные структуры; 4 — границы Киргизской Республики; 5 — пункт взрыва на Камбаратинском эксперименте; 6 — пункты зондирования ГМТЗ

Система МТ-мониторинга Бишкекского геодинамического полигона (БГП) включает [1] (рис. 1):

- стационарные пункты наблюдений Ак-Суу и Чон-Курчак, где осуществляется непрерывная регистрация МТ-поля, продолжительность записи обычно составляет порядка 20 сут, после чего проводится копирование данных с флеш-памяти на ноутбук, техническое обслуживание аппаратуры и ее перезапуск;

- сеть профильных наблюдений миниполигона Кентор, где режим измерений зависит от задач исследования и носит сезонный характер — две сессии (весна и осень);

- режимные пункты МТ-мониторинга, расположенные в наиболее тензочувствительных и помехозащищенных зонах, в которых измерения могут выполняться в различных модификациях магнитотеллурического зондирования (МТЗ) — МТЗ или ГМТЗ (глубинные МТЗ), временной интервал регистрации МТ-поля составляет от нескольких часов до нескольких суток, что опреде-

ляет глубинность зондирований. Магнитотеллурические зондирования выполняются с помощью аппаратуры MTU фирмы “Phoenix Geophysics” (Канада): пятиканальных измерительных станций MTU-5 и MTU-5A, позволяющих регистрировать электрические (E_x, E_y) и магнитные (H_x, H_y, H_z) компоненты магнитотеллурического поля. Полученные результаты обрабатываются по методике азимутального МТ-мониторинга [2] с использованием данных цифровых сетей KNET и KRNET (<http://www.gdirc.ru/lki/napravlenija-issledovanij/sejsmologicheskie-nabljudenija>; <https://seismo.kg/ru>) (рис. 2–4). Для исследования выбрана территория, где чувствительность сети KNET достаточна для регистрации событий энергетических классов по Раутиан $K \geq 7$ (магнитуды не менее 1.7) практически без пропусков.

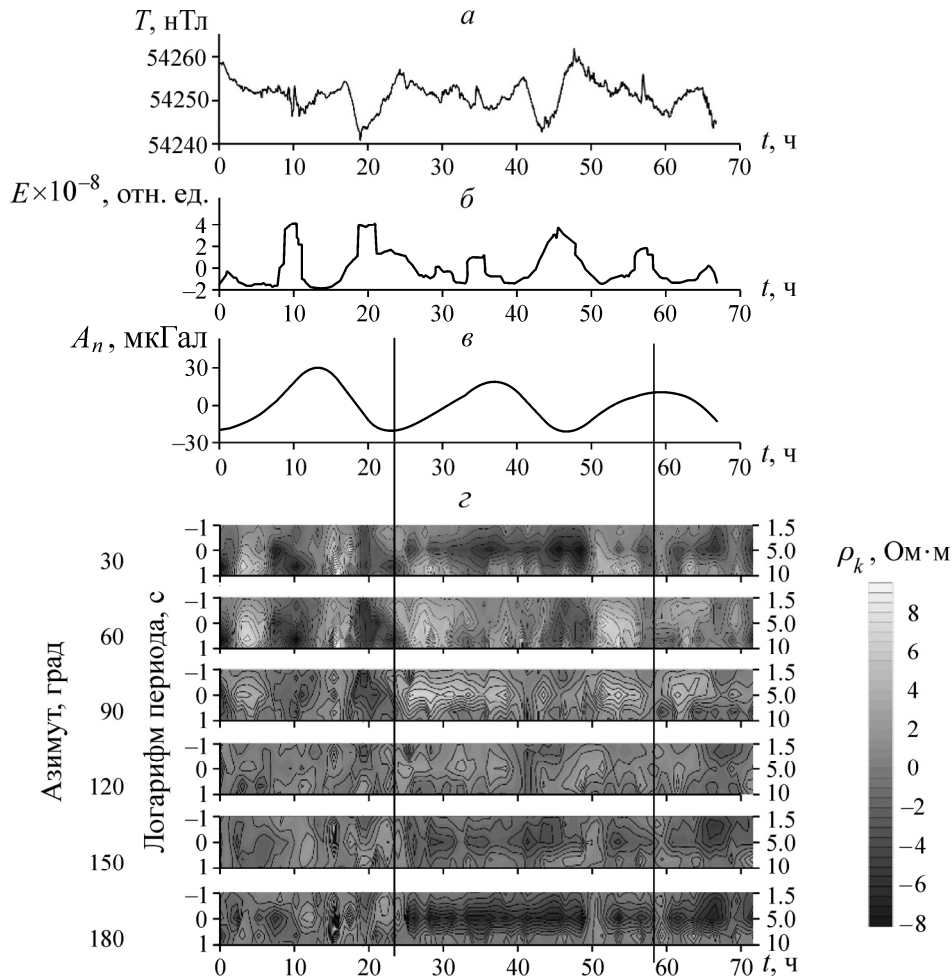


Рис. 2. Сопоставление вариации анизотропных свойств электрического сопротивления (пункт Камбарата) с вариацией энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения. *a* — Sq -вариации магнитного поля; *б* — энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения; *в* — вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n ; *г* — кажущееся сопротивление по разным азимутам. Вертикальными линиями показаны моменты сейсмических событий вблизи пункта

Начиная с 2017 г. на пунктах МТ-мониторинга выполняется ряд экспериментов, которые проводятся для территории БГП впервые. Суть экспериментов представляет собой попытку выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения в полевых записях магнитотеллурических зондирований. Теоретические основы заключаются в следующем — для построения системы обработки данных МТЗ с целью изучения геодинамической активности геологической среды необходимо знать импеданс нижнего полупространства Z , который можно найти в период геодинамического затишья на основе соотношения [3]:

$$E_0 = ZH_0 + Y, \quad (1)$$

где E_0 , H_0 — тангенциальные компоненты электрического и магнитного полей на поверхности слоистого разреза; Z — импеданс нижнего полупространства; Y — электромагнитное поле источников, находящихся в нижнем полупространстве.

Поскольку с течением времени меняется не только Y , но и Z_0 , то

$$E_0 = (Z_0 + \Delta Z(t))H_0 + Y = Z_0H_0 + (\Delta Z(t)H_0 + Y), \quad (2)$$

при этом изменение связано с ионосферными токами низкой частоты, а $\Delta Z(t)H_0$ — с более высокочастотными.

Обратная задача пассивного электромагнитного мониторинга современных геодинамических процессов — вычисление по известному импедансу нижнего полупространства Z электромагнитного поля источников в нижнем полупространстве Y :

$$Y = E_0 - ZH_0. \quad (3)$$

Последнее уравнение справедливо при любых источниках, находящихся в нижнем полупространстве (не обязательно слоистом) и его параметрах. Далее ставится задача определения по вычисленному на дневной поверхности значению Y местоположения области разрушения горной породы и количественной оценки интенсивности процессов.

Одна из задач экспериментов — сопоставление энергетической характеристики выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов. Под энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения будем понимать интеграл по частоте от $\int_0^{\Delta W} |Y(w)d\omega|$ полученный после преобразования Фурье зарегистрированных сигналов во временной области в течение 1 ч.

Основным фактором, влияющим на суточные вариации кажущегося сопротивления ρ_k , могут быть лунно-солнечные приливные воздействия [2]. Изменение физических свойств горных пород в зоне динамического влияния разлома, а также вариации флюидного режима определяют особенности проявления геоэлектрических эффектов, например, электрокинетического в верхней части разреза земной коры. В связи с этим, кривые приливных ускорений под действием Луны и Солнца получены расчетным путем в программе TIDE.exe для каждого пункта наблюдений.

Мониторинговые магнитотеллурические наблюдения за вариациями естественных электрических полей на территории БГП показали, что в естественном электрическом поле возникают сейсмоэлектрические эффекты, связанные с событиями (с энергетическими классами $K > 6$), произошедшими на дистанциях вплоть до 200 км от пункта наблюдений [2]. Для сейсмоэлектрического эффекта 1-го рода характерно длительное время релаксации, достигающее порой нескольких суток [2]. Из чего сделан вывод о том, что эффект отражает необратимые процессы преобразования геологической среды, которые встречаются в трещиноватых породах [4]. Дальнейшие рассуждения строятся на предположении, что смещение электрических зарядов существует в горных породах вследствие раскрытия и схлопывания трещин.

Рассмотрим примеры выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения с помощью мониторинговых данных, полученных как на стационарных пунктах, так и на режимных пунктах ГМТЗ (рис. 1) территории Северного Тянь-Шаня. С этой целью подробнее рассмотрим результаты обработки полевых записей стационарного пункта Ак-Суу и режимного пункта Укок, где по первому часу записи электромагнитного поля определялся магнитотеллурический импеданс геологической среды, который использовался для обработки данных ГМТЗ по каждому последующему часу. Затем вычислялся модуль вектора горизонтальных компонент электрического поля эндогенного происхождения $|Y|$ с последующим осреднением по пяти точкам для часовых наблюдений и по 100 точкам по частоте. В результате обработки восьми суточ-

ных полевых записей ГМТЗ для пункта Ак-Суу и Укок выделено электромагнитное поле эндогенного происхождения и получено распределение энергии этого поля в пределах трех суток для всех частот зондирования (рис. 3, 4). После этого проведено сопоставление энергетической характеристики выделенного электромагнитного поля эндогенного происхождения с параметрами лунно-солнечных приливов.

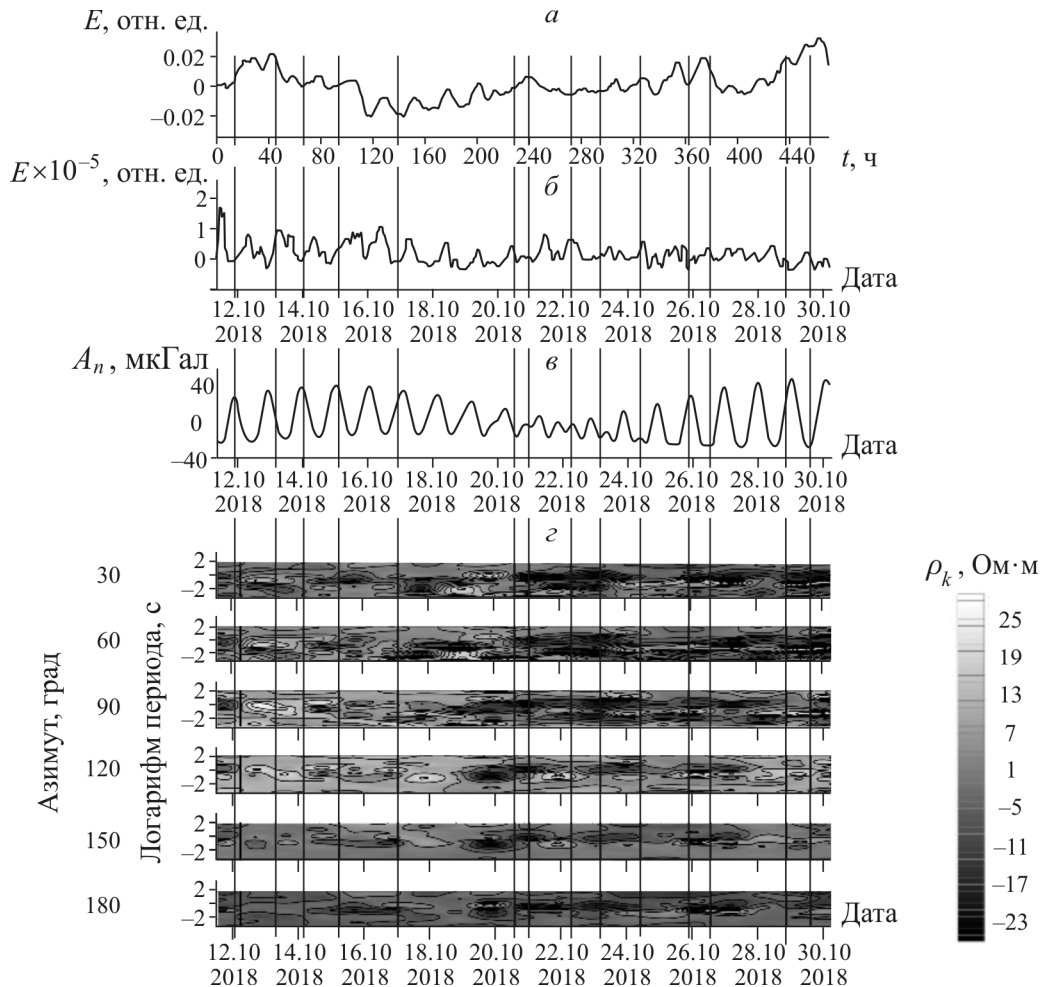


Рис. 3. Сопоставление вариации анизотропных свойств электрического сопротивления (пункт Аксу) с вариацией энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения: *a* — энергетическая характеристика сейсмического поля; *б* — энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения; *в* — вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n ; *г* — кажущееся сопротивление по разным азимутам. Вертикальными линиями показаны моменты сейсмических событий вблизи пункта

Частотно-временные ряды (ЧВР) представляют собой форму изменчивости структуры измеряемых компонент электромагнитного поля (логарифм периода зондирования) при повороте системы координат на определенный угол (в градусах) [1, 2]. На рис. 3 и 4 приведены ЧВР с шагом 30° по азимуту, где отложены вариации кажущегося сопротивления ρ_k , т. е. разница между средним и текущим значениями по рассматриваемому азимуту.

На рис. 3 показаны ЧВР вариаций электропроводности и соответствующие им изменения энергетических характеристик для электрической составляющей электромагнитного поля и сейсмического поля эндогенного происхождения. Результат сопоставления приводит к наглядной взаимосвязи параметров геосреды в зависимости от удаленности и магнитуды землетрясения, а также от места наблюдения. Исследование проведено в период 11–30 октября 2018 г. на территории Бишкекского геодинамического полигона на стационарном мониторинговом пункте Ак-Суу.

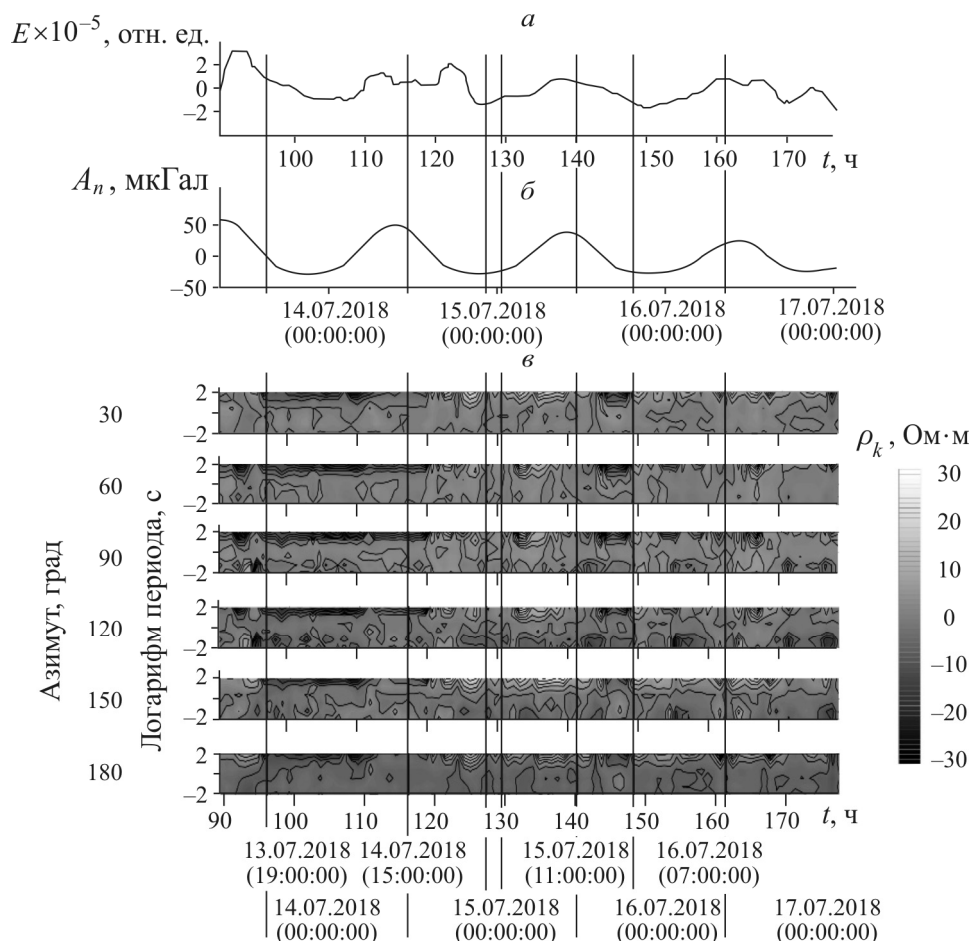


Рис. 4. Сопоставление вариации анизотропных свойств электрического сопротивления (пункт Укок) с вариацией энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения: *a* — энергетическая характеристика электромагнитного поля эндогенного происхождения; *b* — вертикальная компонента лунно-солнечных приливов A_n ; *v* — кажущееся сопротивление по разным азимутам. Вертикальными линиями показаны моменты сейсмических событий вблизи пункта

Необходимо отметить, что, во-первых, моменты возникновения землетрясений в основном тяготеют к областям спада энергетической характеристики ЭМ поля, во-вторых, отрицательные отклонения кажущегося сопротивления с четкими границами во времени обусловлены сменой напряженно-деформированного состояния среды. В-третьих, в вариациях энергетических характеристик прослеживаются периодические составляющие, связанные с лунно-солнечными приливами.

С целью развития комплексирования методов на полигоне научной станции РАН в г. Бишкеке с августа 2018 г. установлена трехкомпонентная сейсмическая градиентная станция на базе группированных однокомпонентных велосиметров GS-20DX производства Geospace Technologies (USA). Ее габаритные размеры составляют $1 \times 1 \times 1$ м. Описание и принцип работы даны в [5]. По адаптированной методике расчета энергетической характеристики для сейсмического поля эндогенного происхождения E [5] из непрерывной записи выбираются только те импульсы, которые зарегистрированы в субвертикальном направлении по отношению к точке наблюдения на поверхности. Значения E усредняются во временном окне длительностью 1 ч. Вариации энергетических характеристик сейсмического (рис. 3а) и электромагнитного (рис. 3б) полей свидетельствуют о глубинных процессах, протекающих в земной коре. Однако отклик в геофизических полях различен. Видно, что существует запаздывание и “расплывчатость” аномалий. Это, вероятно, связано с множественностью геолого-геофизических зависимостей и различных причин.

Анализ функции взаимной корреляции свидетельствует о том, что причиной изменения энергетической характеристики электромагнитного поля эндогенного происхождения являются лунно-солнечные приливы. Таким образом, можно говорить о присутствии причинно-следственной связи между лунно-солнечными приливами и энергетической характеристикой электромагнитного поля эндогенного происхождения.

ВЫВОДЫ

Впервые для территории Бишкекского геодинамического полигона применен подход, согласно которому электромагнитное поле эндогенного происхождения входят в импедансные соотношения аддитивным образом, что позволяет разделить электромагнитное поле, зарегистрированное на дневной поверхности, по положению источников.

На основе полевых экспериментов показаны примеры выделения электромагнитного поля эндогенного происхождения (расчет энергетической характеристики).

В результате сопоставления характеристик электромагнитного поля (энергетических характеристик) лунно-солнечных приливных воздействий, вариаций кажущегося сопротивления и распределения сейсмичности установлено, что: 1) моменты возникновения землетрясений в основном тяготеют к областям спада энергетической характеристики электромагнитного поля; 2) существует приуроченность сейсмических событий к градиентным зонам изменений кажущегося сопротивления; 3) в вариациях энергетических характеристик прослеживаются периодические составляющие, связанные с лунно-солнечными приливами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Rybin A. K.** Deep structure and recent geodynamics of the Central Tien Shan by magnetotelluric research results, Russian academy of sciences, Research station of RAS in Bishkek, Moscow, 2011, 232 pp. (in Russian) [**Рыбин А. К.** Глубинное строение и современная геодинамика Центрального Тянь-Шаня по результатам магнитотеллурических исследований. Российская академия наук, Научная станция РАН в г. Бишкеке. — М., 2011. — 232 с.]
2. **Batelev V. Yu.** The structure and state of the lithosphere matter of the Central Tien Shan (by deep magnetotelluric sounding data), Doctor of Geol. Min. Sci. Thesis, Novosibirsk, 2014, 282 pp. (in Russian) [**Баталев В. Ю.** Структура и состояние вещества литосферы Центрального Тянь-Шаня (по данным глубинных магнитотеллурических зондирований): дис. ... докт. геол.-мин. наук. — Новосибирск. — 2014. — 282 с.]
3. **Aleksandrov P. N., Rybin A. K., and Zabinyakova O. B.** The Separation of the Electromagnetic Field at the Position of the Sources in the Magnetotelluric Method, Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya estestvennye nauki, 2018, vol. 160, Book 2, pp. 339–351. (in Russian) [**Александров П. Н., Рыбин А. К., Забиякова О. Б.** Разделение электромагнитного поля по положению источников в методе МТЗ // Ученые записки Казанского университета. Сер. Естественные науки. — 2018. — Т. 160. — Кн. 2. — С. 339–351.]
4. **Manshtein A. K., Nesterova G. V., Filatov V. V., and Saeva O. P.** Assessing magnitude of seismoelectric effect of the first kind, Seismic Technologies, 2013, no. 4, pp. 81–88. (in Russian) [**Манштейн А. К., Нестерова Г. В., Филатов В. В., Саева О. П.** Об оценке величины сейсмoeлектрического эффекта первого рода // Технологии сейсморазведки. — 2013. — № 4. — С. 81–88.]
5. **Kaznacheev P. A., Matyukov V. E., Aleksandrov P. N., and Nepeina K. S.** Development of three-axis gradient system for seismoacoustic data acquisition in geodynamically active regions, Seismic Instruments, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 46–58. (in Russian) [**Казначеев П. А., Матюков В. Е., Александров П. Н., Непейна К. С.** Разработка и опробование трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных регионах // Сейсмические приборы. — 2019. — Т. 55. — № 1. — С. 46–58.]