



ELECTROMAGNETIC MONITORING DURING THE AFTERSHOCK PERIOD OF THE 2003 CHUYA EARTHQUAKE IN THE MOUNTAIN (GORNYY) ALTAI: MEASUREMENT METHODOLOGY, RESULTS

A.E. Shalaginov ^{1,2✉}, N.N. Nevedrova ^{1,3}

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

²Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Ave, Novosibirsk, 630073, Russia

³Novosibirsk State University, 2 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

ABSTRACT. The article considers the method of observations, interpretation of data and results of electromagnetic monitoring with a controlled source for one of the seismically active regions of Siberia – Mountain (Gornyy) Altai. The monitoring is carried out during the aftershock period in the epicentral zone of the destructive Chuya earthquake of 2003 with $M=7.3$. For regular observations, a measurement technique has been developed with several modifications of the transient electromagnetics method (TEM) to determine variations in electrical resistivity and anisotropy coefficient. The long-term series of these two geoelectric parameters of the section are presented, compared with the characteristics of the ongoing seismic events. The analysis shows that variations in electrical resistance and electrical anisotropy reflect the development and gradual attenuation of aftershock activity of a powerful earthquake. The advantages of the TEM method and the chosen methodology for monitoring in complex areas are reflected.

KEYWORDS: electromagnetic monitoring; TEM; electrical conductivity variations; electrical anisotropy coefficient; seismicity characteristics; Mountain (Gornyy) Altai

FUNDING: The research was carried out with the financial support of the Fundamental Scientific Research Program FWZZ-2022-0025.



RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Aleksandr E. Shalaginov, shalaginovae@ipgg.sbras.ru

Received: July 22, 2022

Revised: March 9, 2023

Accepted: March 14, 2023

FOR CITATION: Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., 2023. Electromagnetic Monitoring during the Aftershock Period of the 2003 Chuya Earthquake in the Mountain (Gornyy) Altai: Measurement Methodology, Results. *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (4), 0714. doi:10.5800/GT-2023-14-4-0714

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ В АФТЕРШОКОВЫЙ ПЕРИОД ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 г. В ГОРНОМ АЛТАЕ: МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ, РЕЗУЛЬТАТЫ

А.Е. Шалагинов^{1,2}, Н.Н. Неvedрова^{1,3}

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20, Россия

³ Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

АННОТАЦИЯ. В статье рассмотрена методика наблюдений, интерпретации данных и результаты электромагнитного мониторинга с контролируемым источником для одного из сейсмоактивных регионов Сибири – Горного Алтая. Мониторинг выполняется в афтершоковый период в эпицентральной зоне разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. с $M=7.3$. Для регулярных наблюдений разработана методика измерений несколькими модификациями метода зондирования становлением электромагнитного поля (ЗСБ) для определения вариаций удельного электрического сопротивления и коэффициента анизотропии. Приведены многолетние ряды этих двух геоэлектрических параметров разреза, сопоставленные с характеристиками происходящих сейсмических событий. В результате анализа показано, что вариации электросопротивления и коэффициента электрической анизотропии отражают развитие и постепенное затухание афтершоковой активности мощного землетрясения. Отражены преимущества метода ЗСБ и выбранной методики для мониторинга в сложно построенных районах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электромагнитный мониторинг; метод зондирования становлением поля; вариации электропроводности; коэффициент электрической анизотропии; характеристики сейсмичности; Горный Алтай

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований № FWZZ-2022-0025.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электромагнитные методы, наряду с сейсмическими, широко используются для мониторинга состояния геологической среды в сейсмоактивных районах, а также для решения экологических и инженерных задач (контроль за состоянием плотин, дамб, хвостохранилищ опасных отходов, фундаментов зданий и пр.). Электромагнитные методы с контролируемым источником классифицируются по целому ряду характеристик, отличаются способами возбуждения и регистрации поля. Для успешного проведения мониторинга важным является выбор конкретного метода. Чаще всего для регулярных наблюдений привлекают модификации электромагнитного зондирования становлением поля (ЗСБ), магнитотеллурические зондирования, а также методы сопротивлений, такие как вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ), электротомография [Lu et al., 1999; Stanica D., Stanica M., 2007; Bataleva et al., 2013; Bataleva, Mukhamadeeva, 2018; Shaparenko, Nevedrova, 2018; Nevedrova et al., 2019; Rymarczyk et al., 2019; Zheltenkova et al., 2020; Danilenko et al., 2021]. Каждый из указанных методов имеет свои преимущества и недостатки; в первую очередь, они имеют разную глубинность исследования, чувствительность и разрешающую способность. К наиболее глубинной модификации активной электроразведки относится метод ЗСБ, его глубинность ограничивается в основном энергетическими

параметрами и размерами установок. Для этого метода высокоомные горизонты не являются экранами, он чувствителен к проводящим объектам.

Выбор конкретного метода исследования должен основываться на знании строения участка исследования. Особенно это важно для горных регионов, в которых строение осложнено складчатостью, многочисленными разрывными нарушениями, существенными перепадами рельефа. Методика интерпретации данных электроразведки, полученных в районах с высокой сейсмической активностью, имеет свои особенности [Eпов et al., 2006]. Участок исследования, который рассматривается в этой статье, расположен в Чуйской впадине Горного Алтая. Строение Чуйской впадины изучалось в несколько этапов комплексом методов электроразведки, включающим ЗСБ, ВЭЗ, электротомографию. На первом этапе в 2000-х годах получены геоэлектрические модели осадочного чехла, глубины до фундамента, выделены разломные нарушения [Nevedrova et al., 2001]. Второй этап был связан с уточнением геоэлектрического строения участков мониторинга в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения 2003 г. с магнитудой 7.3, охватившей Курайскую, Чуйскую впадины и их горное обрамление [Nevedrova, Sanchaa, 2011; Deev et al., 2012; Sanchaa et al., 2021]. Для этого структурные измерения методами электротомографии и ЗСБ проводились параллельно с мониторингом, в результате чего была выделена и обоснована

геологическими данными разломная трещиноватая зона в центре участка исследования, активизированная сильным событием [Shalaginov, Nevedrova, 2015]. Пункты регулярных электромагнитных наблюдений на территории Чуйской впадины размещались с учетом особенностей строения, часть из них находится в зоне динамического влияния разлома [Sherman et al., 1983]. С учетом того, что глубины до фундамента в Чуйской впадине достигают 1000 м и более, для мониторинга оптимально использование именно метода ЗСБ.

Статья является продолжением диссертационного исследования [Shalaginov, 2017], и ее основная цель – обоснование использованной методики наблюдений, преимуществ метода ЗСБ с использованием нескольких модификаций метода для проведения регулярных наблюдений в сейсмоактивных районах. Методика рассматривается с точки зрения теоретических основ и практической реализации. Кроме того, в статье приведены результаты интерпретации временных рядов ЗСБ за длительный период наблюдений, сопоставленные с характеристиками сейсмической активности Чуйско-Курайской зоны. Многолетние ряды ярко отражают периоды сейсмической активизации и затишья афтершокового периода Чуйского землетрясения.

2. МЕТОДИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА В ЧУЙСКОЙ ВПАДИНЕ ГОРНОГО АЛТАЯ

Регулярные многолетние наблюдения в Горном Алтае выполняются с 2007 г. отрядом электромагнитного мониторинга Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН в афтершоковый период Чуйского землетрясения 2003 г. с $M=7.3$ в центральной части Чуйской впадины в районе пос. Мухор-Тархата. Очаговая зона землетрясения охватила значительную часть впадины, и его последствия проявились многочисленными разрушениями жилой и промышленной инфраструктуры, а также серией сейсмодислокаций, включая район электромагнитных наблюдений. Измерения реализуются методом ЗСБ с использованием индукционных (Q, q), комбинированных (AB-q) и гальванических (AB-MN) установок [Vanyan, 1997].

Для реализации полевых работ используется установка «соосные петли» (Q, q) со стороны генераторного контура (Q) в 200 м, а приемного контура (q) – в 100 м. Соосная установка обеспечивает высокую локальность зондирования, именно по ее данным построена базовая изотропная геоэлектрическая модель. Для комбинированных и гальванических установок используется генераторная линия АВ длиной 910 м, измерения выполняются: а) приемным одновитковым контуром квадратной формы со стороной 200 м (установка АВ-q) с целью уточнения строения, б) заземленной электрической линией MN длиной 200 м (установка АВ-MN). Разнос между генераторной линией АВ и приемными установками варьируется от 200 до 1000 м. Для измерений используется электроразведочный комплекс

«Байкал МЭРС-Т» [Babushkin et al., 2021]. Система МЭРС-Т имеет модульную структуру, состоящую из отдельных регистраторов. Каждый регистратор – 4-канальный прибор для сбора данных, при этом три низкочастотных канала (до 4 кГц) созданы на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 31 бит, и один высокочастотный канал (до 100 кГц) – на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 24 бита. В состав регистратора входит GPS-модуль, который привязывает измеряемые данные к всемирному времени (UTM) с точностью менее 1 мкс, съемная флеш-карта SD с файловой системой FAT-32.

Для возбуждения импульсного тока в генераторной установке используется коммутатор тока, собранный на IGBT транзисторах. Источниками напряжения на входе генератора являются аккумуляторные батареи необходимой емкости, с напряжением от 12 до 600 В. В генераторе токовых импульсов реализована цифровая запись формы токовых импульсов. При проведении измерений ток в источнике выбирается в интервале 21.0–21.5 А. Длительность токовых импульсов для генераторной петли составляет 100 мс, для генераторной линии – 1 с.

Поскольку сигнал установки АВ-MN существенно зависит от анизотропии проводимости, при измерении электрических компонент поля при гальваническом возбуждении и регистрации сигнала можно исследовать влияние электрической анизотропии массива горных пород.

Рассмотрим, как влияет анизотропия проводимости на электрические компоненты поля на примере анизотропного полупространства. Пусть заземленные источник и приемник расположены на дневной поверхности над анизотропным полупространством с сопротивлением среды ρ_n и ρ_t (рис. 1).

Выражения для компонент электрического поля при выключении тока имеют вид [Goldman, Kaufman, 1971] (1):

$$E_x = \frac{I \cdot \rho_t}{2\pi r^3} e_x, \quad E_y = \frac{I \cdot \rho_t \cdot \sin 2\varphi}{4\pi r^3} e_y, \quad (1)$$

где e_x и e_y выглядят следующим образом (2, 3):

$$e_x = \Phi(u_t) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_t e^{-u_t^2} + \left[(1 - 3\cos^2 \varphi) \Phi(u_t) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_t e^{-u_t^2} \cos^2 \varphi \right] - \Lambda \left[(1 - 3\cos^2 \varphi) \Phi(u_n) + \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_n e^{-u_n^2} \cos^2 \varphi \right], \quad (2)$$

$$e_y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_t e^{-u_t^2} - 3\Phi(u_t) - \Lambda \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} u_n e^{-u_n^2} - 3\Phi(u_n) \right], \quad (3)$$

где $u_t = \frac{r\sqrt{\mu_0}}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho_t t}}$, $u_n = \frac{r\sqrt{\mu_0}}{2} \sqrt{\frac{1}{\rho_n t}}$.

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi, \quad \Lambda = \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_t}} = \sqrt{\frac{\sigma_t}{\sigma_n}},$$

где Φ – интеграл вероятности; r и φ – соответственно радиус и азимут точки измерения; ρ_n и ρ_t – продольное и поперечное сопротивление; Λ – коэффициент электрической анизотропии.

В частности, если приемник находится на оси диполя ($\varphi=0$), компонента e_y равна 0, то формула для e_x переписывается так (4):

$$e_x = -\Phi(u_t) - 2\Lambda \left[-\Phi(u_n) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} u_n e^{-u_n^2} \right]. \quad (4)$$

Видно, что компоненты e_x и e_y зависят от коэффициента электрической анизотропии и азимутального угла (рис. 2). На кривых становления компоненты e_x ($\varphi=\pi/2$) имеется максимум, координаты которого зависят от коэффициента электрической анизотропии, эта особенность в поведении компоненты поля e_x может быть использована для оценки коэффициента электрической анизотропии Λ .

Однако измерения с установкой АВ-MN, по сравнению с другими модификациями ЗСБ, более подвержены влиянию различных искажающих факторов, таких как неоднородности разреза и вызванная поляризация (ВП) горных пород. Предшествующие мониторингу опытно-методические работы показали, что для достоверного определения геоэлектрических параметров необходимо совместно использовать несколько модификаций метода ЗСБ.

При индукционном возбуждении поля и регистрации сигнала локальные приповерхностные неоднородности, являющиеся геоэлектрическими помехами, влияют слабо, так как порождаемые ими искажения носят в основном гальванический характер. Совместное использование индукционной и гальванической установок при измерениях в одном пункте приводит к снижению действия принципа эквивалентности, что позволяет надежно и достоверно определить как изотропные, так и анизотропные параметры модели. На первом этапе по данным соосной индукционной установки определяется геоэлектрическая модель, которая для контроля согласовывается с моделью, полученной с установкой (АВ-г), и затем оцениваются изотропные параметры всех горизонтов геоэлектрического разреза.

На втором этапе коэффициент анизотропии (Λ) определяется по данным гальванической установки. Выбранная методика измерения обусловлена наименьшим влиянием искажающих факторов на установку «соосные петли», а установка АВ-MN, по которой возможно определение Λ , наиболее технологична при проведении полевых работ и позволяет количественно оценить вариации коэффициента анизотропии [Nevedrova, Shalaginov, 2015]. Вместе с тем следует отметить, что при измерениях гальванической установкой важно подобрать ее параметры так, чтобы измеренный сигнал был искажен минимально.

При проведении измерений особые требования предъявляются к точности и повторяемости измерений. Для анализа относительной погрешности измерений проводятся повторные измерения с индукционными и гальваническими установками в контрольных точках. Повторные измерения индукционной установкой выполняются в пункте ЗСБ 1, гальванической

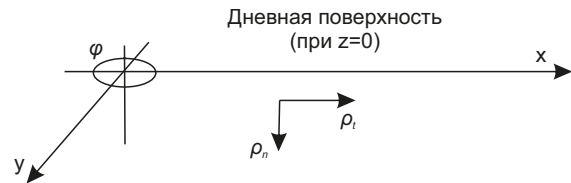


Рис. 1. Модель анизотропного полупространства.

Fig. 1. Anisotropic half-space model.

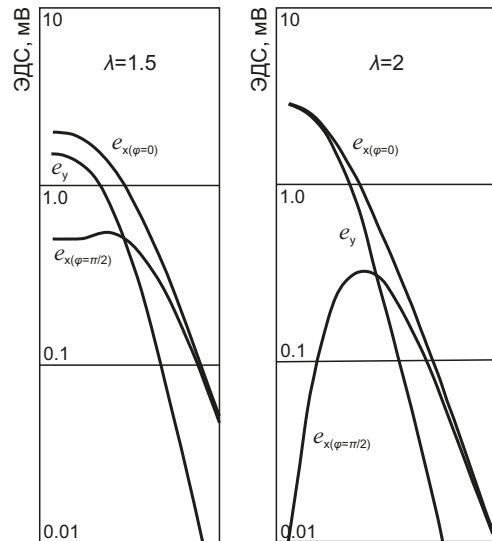


Рис. 2. Зависимость компонент e_x, e_y от коэффициента электрической анизотропии и азимутального угла [Goldman, Kaufman, 1971].

Fig. 2. Dependence of the components e_x, e_y on the electrical anisotropy coefficient and azimuth angle [Goldman, Kaufman, 1971].

установкой АВ-MN – в пункте ЗСБ 6. При обработке сигналов программным путем производится нормировка каждого единичного воздействия на соответствующий ему уровень токового импульса. Относительная погрешность рассчитывалась по данным рабочей и контрольной точек относительно среднего значения этих измерений [Electrical Prospecting Guidelines..., 1984].

Анализ значений относительной погрешности измерений по данным ЗСБ 1 с установкой Q, г (рис. 3, а) показывает то, что в рабочем интервале измерений 0.12–11.0 мс относительная погрешность не превышает 0.2–0.5 %. Значения относительной погрешности по данным ЗСБ 6 (рис. 3, б) с установкой АВ-MN во временном диапазоне, для которого выполняется интерпретация, составляют 0.5–1.0 %. Достигнутый уровень точности повторных измерений позволяет проводить анализ вариаций УЭС и коэффициента электрической анизотропии на участке исследования.

На этапе подготовительных опытно-методических электромагнитных наблюдений в Горном Алтае были выполнены зондирования установкой АВ-MN с разным размещением приемной линии MN относительно генераторной линии АВ, изменялся как азимутальный угол ϕ , так и угол ψ между линиями MN и АВ (рис. 4, а).

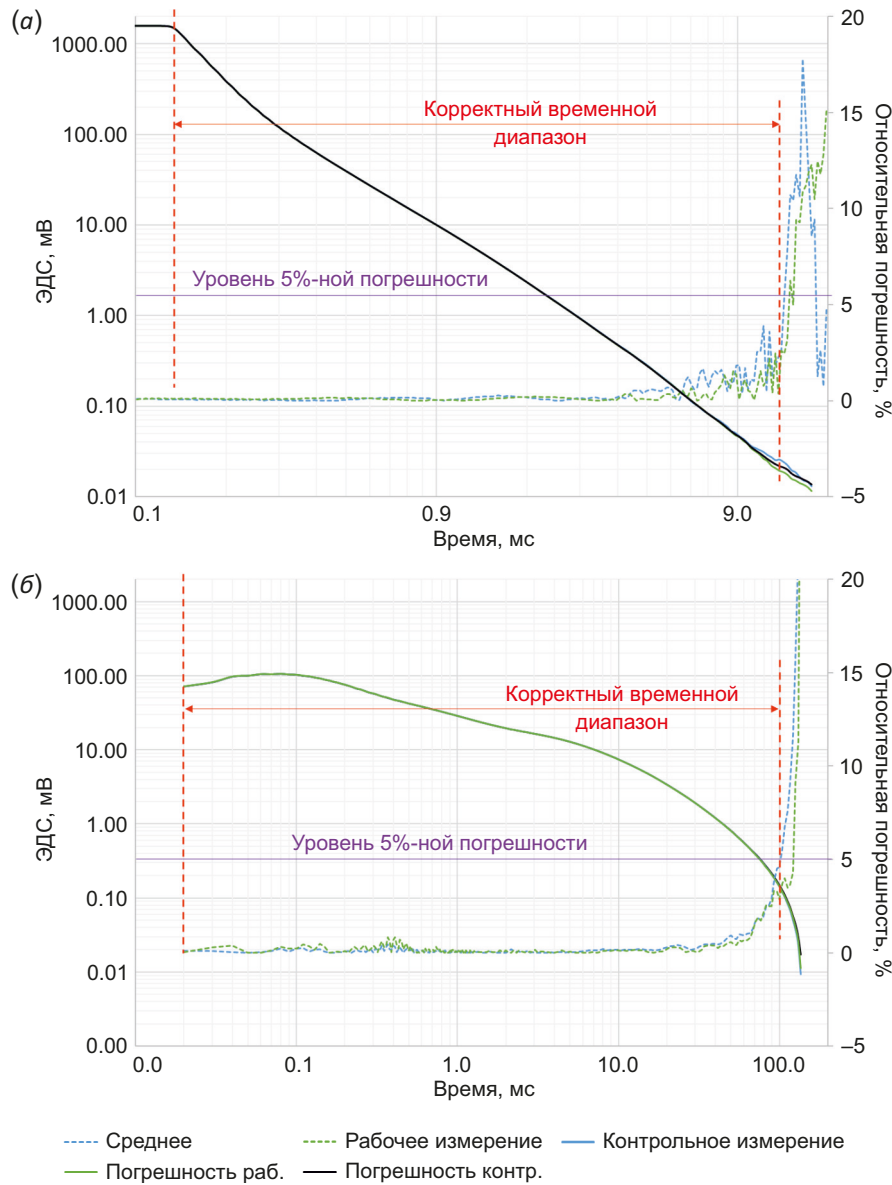


Рис. 3. График относительной погрешности измерения по данным ЗСБ 1 с индукционной установкой (а) и график относительной погрешности измерения по данным ЗСБ 6 с гальванической установкой(б).

Fig. 3. Graph of the relative measurement error according to the TEM data point 1 with an induction arrangement (а) and graph of the relative measurement error according to the TEM data point 6 with a galvanic arrangement (б).

Измерения линий MN были выполнены в девяти пунктах с разными азимутальными углами ϕ и углами $\psi=0, 45, 90^\circ$ (рис. 4, б). В данном случае выполнение всех измерений только в западном направлении от генераторной линии обусловлено тем, что она расположена на окраине поселка Мухор-Тархата, а размещение пунктов на его территории вызывает затруднения. Заземление линии АВ выполнено очень надежно, с использованием металлической обсадки двух самоизливающихся скважин, что позволило в целом получить необходимую амплитуду сигнала и высокое качество измерений.

Из сопоставления кривых электродвижущей силы (ЭДС) для измерений под разными азимутальными углами (ϕ) с параллельной установкой получено, что по данным ЗСБ 5, 20 и 21 (азимутальные углы $70-85^\circ$)

наблюдается искажение кривой ЭДС на поздних временах, предположительно связанное с неоднородностями разреза или с вызванной поляризацией. Для остальных пунктов, для которых азимутальные углы составляли $40-50^\circ$, на кривой ЭДС на поздних временах искажения отсутствуют. Например, из сравнения результатов интерпретации данных для ЗСБ 5 и 6 (рис. 5) видно, что по данным ЗСБ 5 с азимутальным углом 84° на поздних временах наблюдается характерное искажение полевой кривой. По данным пункта 6 с азимутальным углом 46° погрешность подбора минимальна и геоэлектрическая модель соответствует горизонтально-слоистой.

Таким образом, по результатам анализа полевых данных был сделан вывод, что в геоэлектрических

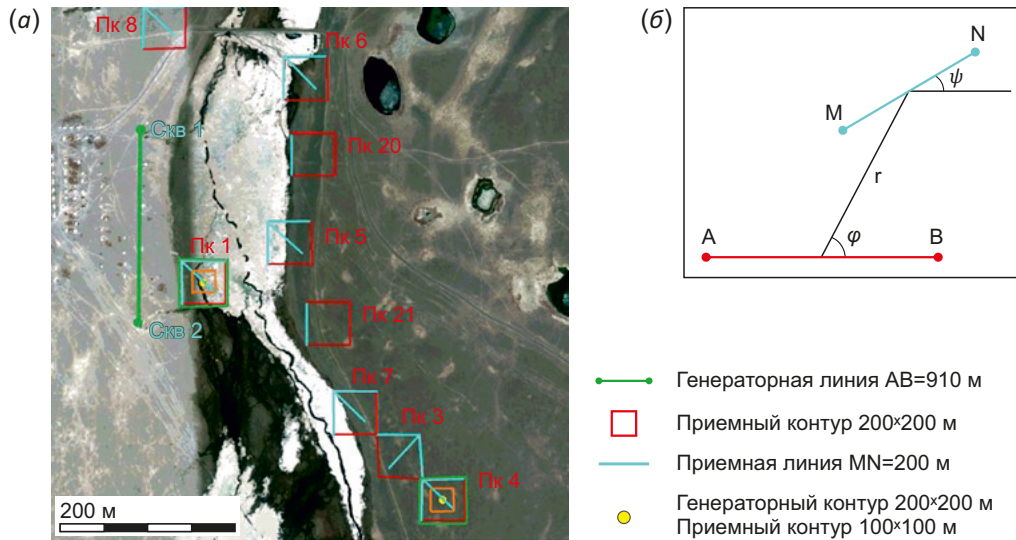


Рис. 4. Схема расположения линии MN относительно линии AB (а) и схема расположения пунктов измерения при проведении эксперимента на участке Мухор-Тархата (б).

Fig. 4. The layout of the MN line relative to the AB line (a) and the layout of the measurement points during the experiment at the Mukhor-Tarkhat site (b).

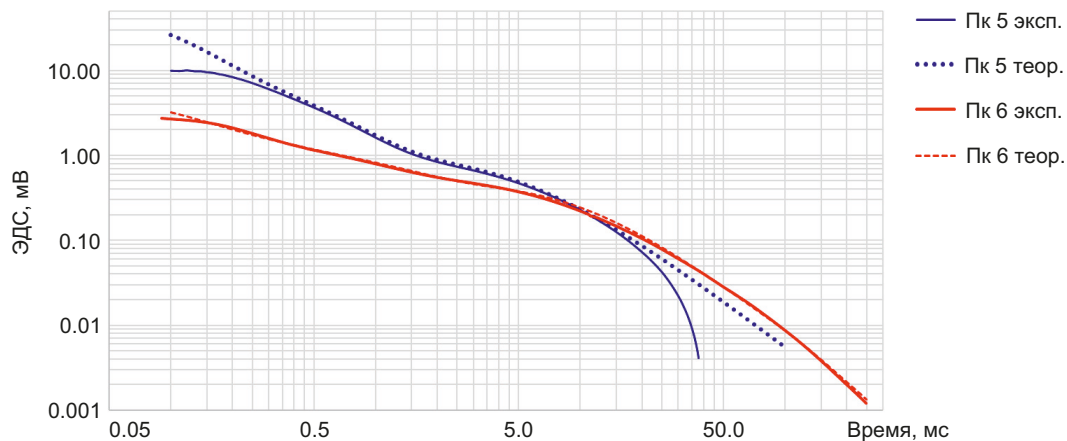


Рис. 5. Сопоставление кривых ЭДС ЗСБ 5 и 6 с теоретическими кривыми.

Fig. 5. Comparison of EMF curves of TEM points 5 and 6 with theoretical curves.

условиях участка исследования при размещении линии MN под углами 40–50°, полученные данные наименее искажены и погрешность подбора теоретической кривой минимальна.

В какой-то мере этот результат обоснован исследованиями, приведенными в публикациях [Shein, 2010; Antonov, 2011]. В своих работах авторы выявили высокую чувствительность гальванической установки к взаимному расположению линий. Для параллельной азимутальной установки установлено, что на карте изолиний сигналов для поздних времен становления поля всегда присутствуют две области, соответствующие положительным и отрицательным значениям сигналов (рис. 6). Также показано, что граница Г, разделяющая эти области, проходит через точки дневной поверхности, где влияние вызванной поляризации существенно ослаблено. Положение границы Г зависит

от размеров генераторной и приемной линий и от параметров среды.

На участке Мухор-Тархата опытным путем для установки АВ-MN с размерами АВ=910 м, MN=200 м и соответствующими геоэлектрическими параметрами среды (табл. 1) получено, что при измерениях под азимутальным углом 40–50° полученные данные наименее искажены.

Затем были сопоставлены полевые и теоретические кривые для измерений под разными углами ψ линии MN относительно линии АВ. Из сопоставления данных для пикета ЗСБ 2 (рис. 7) видно, что теоретическая кривая, рассчитанная для геоэлектрической модели этого участка (табл. 1), лучше всего совпадает с полевой кривой, зарегистрированной при измерении линии MN под углом ψ=0°. Такая же картина наблюдается по данным других пунктов ЗСБ.

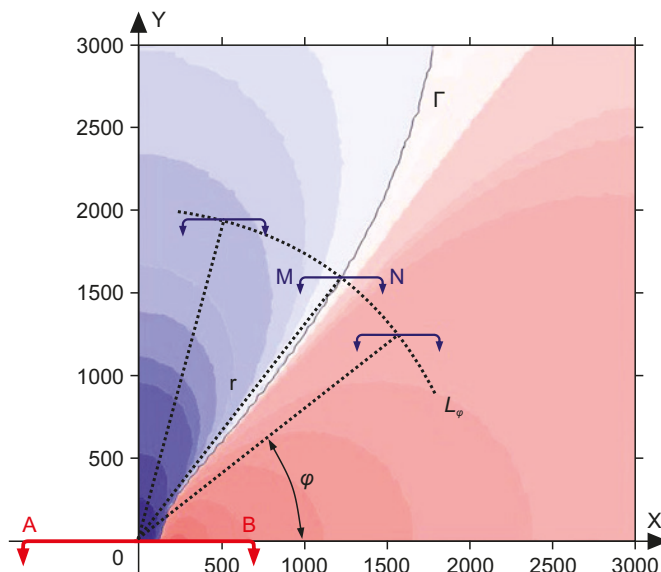


Рис. 6. Поведение откликов поляризуемой среды при гальваническом возбуждении и регистрации сигнала [Shein, 2010; Antonov, 2011].

Fig. 6. Responses of a polarizing medium during galvanic excitation and signal registration [Shein, 2010; Antonov, 2011].

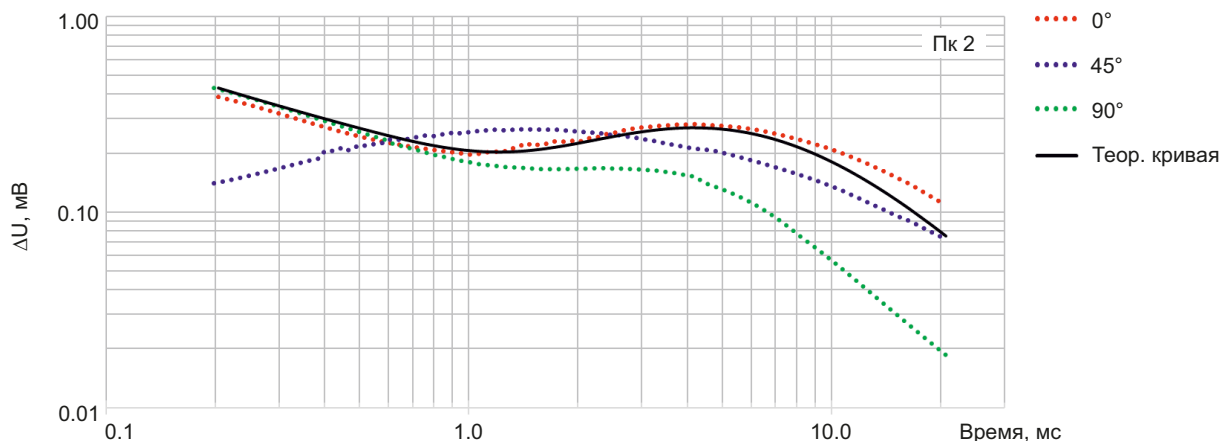


Рис. 7. Сопоставление полевых и теоретических кривых ЗСБ 2 с линией MN с углами ψ=0, 45, 90°.

Fig. 7. Comparison of field and theoretical curves of TEM point 2 with the MN line with angles ψ=0, 45, 90°.

Таблица 1. Геоэлектрическая модель ЗСБ 2
Table 1. Geoelectric model TEM point 2

№ слоя	УЭС, Ом·м	Мощность, м
1	800	130
2	45	270
3	2000	-

На участке Мухор-Тархата для проведения регулярных наблюдений методом ЗСБ за изменением коэффициента электрической анизотропии выбрана и обоснована методика измерений с использованием трех модификаций. Показано, что полевые данные, измеренные параллельной гальванической установкой с азимутальными углами 40–50°, менее всего искажены, а геоэлектрическая модель, полученная в результате

инверсии, соответствует геоэлектрической модели с соосной установкой.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ РЕГУЛЯРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ МЕТОДОМ ЗСБ

Не менее важным является вопрос дальнейшей обработки и интерпретации полученных полевых данных. Интерпретация данных нестационарного электромагнитного зондирования основана на решении обратных задач, когда в каждом регулярном пункте восстанавливается геоэлектрическая модель и затем определяются вариации УЭС и L для каждого слоя модели. Все полевые данные, полученные в Горном Алтае, проинтерпретированы с использованием программных комплексов моделирования и инверсии EMS [Khabinov et al., 2009], и степень влияния текущих сейсмических событий на геоэлектрические характеристики основывается на количественных оценках вариаций УЭС и L .

Кроме того, интерпретация проводится с привлечением большого объема априорных материалов. Стартовая модель формируется по литолого-стратиграфическим данным имеющихся скважин (рис. 8). Для верификации разломных нарушений используются результаты геолого-структурных исследований, тектонические схемы, космические снимки [Zolnikov, 2010].

Методика интерпретации современных данных соответствует предложенной методике измерения – данные ЗСБ с установками «соосные петли» (Q, q) рассматриваются в первую очередь, так как по ним наиболее достоверно можно определить параметры геоэлектрической модели. По результатам инверсии установлено, что полученные геоэлектрические модели типичны для Чуйской впадины, для них характерна достаточно высокоомная верхняя часть и второй проводящий горизонт с УЭС < 100 Ом·м, залегающие на фундаменте с УЭС ≥ 2000 Ом·м [Nevedrova et al., 2001]. В целом эти модели совпадают с моделями по данным других установок, но параметры геоэлектрического разреза определены наиболее надежно. Погрешность определения параметров геоэлектрической модели по данным установок Q, q и АВ-q не превышает 3–4 %, а по данным установки АВ-MN – не превышает 7–9 % (по неискаженной части кривой).

Известно, что измерения с комбинированными (АВ-q) и гальваническими (АВ-MN) установками более подвержены влиянию различных искажений, например ВП горных пород, которая в представленном эксперименте является мешающим фактором.

В работе [Antonov, Shein, 2008] показано, что индукционные и гальванические установки имеют разную чувствительность к вызванной поляризации. При изучении ВП с временем релаксации более 0.1 мс индукционные установки менее эффективны по сравнению с гальваническими, поскольку длительность процесса индукционной «зарядки» среды значительно короче воздействия, производимого электрической линией. Данное свойство может быть использовано для повышения достоверности интерпретации данных гальванических измерений, осложненных присутствием ВП.

Изменения, обусловленные эффектом ВП, при интерпретации данных зондирований приводят к появлению в результирующей модели ложного изолирующего слоя, поэтому рекомендуется поэтапное решение задачи. На первом этапе по данным индукционной установки определяются параметры ρ , h неполяризуемого разреза, а на втором – восстанавливаются параметры модели Коль-Коль (η , τ , c) по данным гальванической установки [Antonov, Shein, 2008].

Результаты исследований Е.Ю. Антонова и А.Н. Шеина, в принципе, подтверждают выбранную в этой статье методику интерпретации, когда сначала по данным соосных петель (Q, q) определяются параметры геоэлектрической модели (ρ , h), которые далее используются для контроля интерпретации данных с комбинированными (АВ-q) и гальваническими (АВ-MN) установками. И в последнюю очередь по данным гальванических

установок (АВ-MN) с известными параметрами ρ , h определяются коэффициенты анизотропии (Λ) геоэлектрического разреза. Определение параметров ВП (η , τ , c) не входило в задачи исследования этой статьи, и при инверсии данных эти параметры не учитывались.

Инверсия данных ЗСБ с установкой АВ-MN проводится после того, как геоэлектрическая модель уже построена и верифицирована. Инверсия начинается с использованием имеющейся изотропной модели. Затем с учетом скважинных, геологических, тектонических данных, обосновывающих анизотропные свойства породных комплексов на этом участке, выполняется инверсия данных с учетом анизотропии электропроводности (анизотропная модель).

Из анализа геоэлектрической ситуации в разломной зоне Чуйского землетрясения было принято, что электрическая анизотропия связана с развитием трещиноватости в верхней части земной коры под воздействием сейсмических событий, поэтому для описания анизотропии используется следующая модель: изотропная вмещающая среда с электропроводностью σ_B испещрена системой ориентированных в некотором направлении трещин, заполненных флюидом с электропроводностью σ_ϕ , объемная доля трещин во вмещающей среде составляет α [Gubatenko et al., 2000]. Хотя локальные свойства такой среды считаются изотропными, в среднем она представляет собой одноосную анизотропную среду с тензором эффективной электропроводности с компонентами σ_n , σ_t и коэффициентом анизотропии Λ , удовлетворяющим неравенству $\Lambda \geq 1$. Эти компоненты определяют, соответственно, эффективную электропроводность среды поперек и вдоль направления трещин и рассчитываются по формулам (5):

$$\sigma_n = \frac{\sigma_B \sigma_\phi}{(1 - \alpha)\sigma_\phi + \alpha\sigma_B}, \quad \sigma_t = \alpha\sigma_\phi + (1 - \alpha)\sigma_B, \quad \Lambda = \sqrt{\frac{\sigma_t}{\sigma_n}}. \quad (5)$$

В результате интерпретации многолетних данных регулярных наблюдений методом ЗСБ получены временные ряды значений УЭС, коэффициента электрической анизотропии и вариации этих параметров для разных слоев геоэлектрического разреза за период 2007–2020 гг.

Регулярные наблюдения за вариациями УЭС с установкой «соосные петли» осуществлялись в двух пунктах – ЗСБ 1 и 4. Максимальная реакция на сейсмическое воздействие по параметру УЭС отмечается во втором проводящем горизонте (погрешность определения параметров геоэлектрических моделей пунктов ЗСБ 1 и 4 не превышает 4 %). Поскольку мощности слоев в пунктах 1 и 4 отличаются, для более корректного сравнения были рассчитаны значения продольной проводимости. Временные ряды продольной проводимости по данным ЗСБ 1 и 4 были сопоставлены с показателями сейсмической активности (рис. 9). В качестве этих показателей было выбрано число сейсмических событий (с магнитудой больше 3 в радиусе 200 км от участка исследования) и количество сейсмической энергии

Геологический возраст	Глубина залегания слоя, м		Мощность слоя, м	Масштаб	Описание пород	Геoeлектрические параметры
	от	до				
Q _{II}				10	Аллювиально-пролювиальные отложения, представленные плохоокатанной галькой с линзами щебенки и гравелитов. Обломочный материал сцементирован суглинком серовато-бурого цвета	Высокоомный слой УЭС ~800 Ом·м
	0.0	60.0	60.0	60		
	60.0	66.6	6.6	Суглинок серовато-бурый карбонатный		
N ₁₋₂ -Q, bec	66.6	78.6	12.0	Глина плотная, серая, карбонатная с прослоями песков и гравелитов		
			3.9			
N ₁₋₂ tr	78.6	128.9	2.0	Переслаивание глин плотных, серых, карбонатных с песком глинистым		
			2.8			
			50.3			
	128.9	152.0	23.1	Глина плотная темно-серая с гравием и гидроокислами железа	Проводящий слой УЭС 35-50 Ом·м	
N ₁ ka	152.0	186.5	34.5	Глина плотная желто-бурая, карбонатная с примесью плохо окатанной гальки		
	186.5	195.7	9.2	Глина плотная, карбонатная		
	195.7	243.0	47.3	Глина плотная, карбонатная с гидроокислами железа и редкой галькой P2 пород		
Pg _s	243.0	260.0	17.0	Переотложенная кора выветривания с крупными обломками коренных пород		
D _{2g} V ₂ th	260.0	280.8	20.8	Алевриты темно-серые тонкослоистые. Слоистость под углом 3° к оси керна		Фундамент девонского возраста УЭС 2000 Ом·м

Рис. 8. Литолого-стратиграфический разрез скважины № 103 (юг Чуйской впадины).

Fig. 8. Lithological and stratigraphic section of well 103 (south of the Chuya depression).

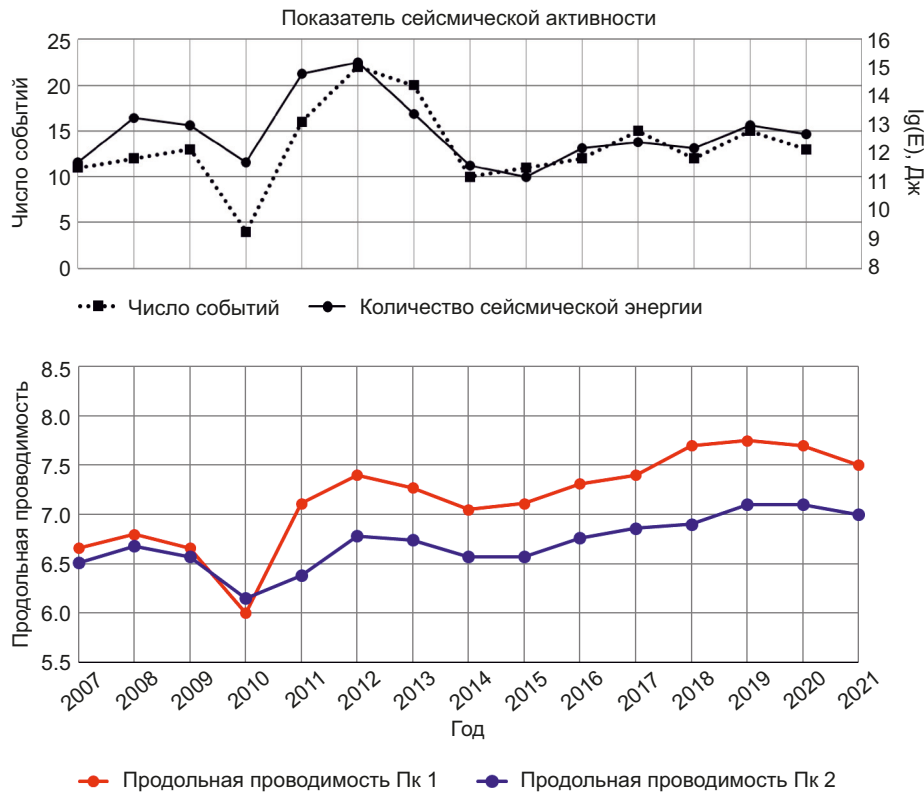


Рис. 9. Сопоставление значений продольной проводимости с показателями сейсмичности в период 2007–2020 гг.
Fig. 9. Comparison of values of longitudinal conductivity with indicators of seismicity in the period 2007–2020.

(выделившейся в Алтае-Саянском регионе); оба показателя неплохо согласуются между собой по временной оси. Установлено, что в периоды мощных сейсмических активизаций 2008–2009 гг. и 2012–2013 гг. наблюдается прямая корреляция изменения продольной проводимости с показателями сейсмической активности, при этом относительные вариации достигают 12–14 %. Начиная с 2014 г. отмечается уменьшение вариаций параметра проводимости (относительные вариации не превышают 4–6 %), которое также коррелирует с обоими показателями сейсмической активности. По рис. 6 видно, что значения проводимости для ЗСБ 1 выше относительно ЗСБ 4. Это можно объяснить тем, что пункт 1 размещен в пойме реки ближе к зоне разлома и реакция на сейсмическое воздействие для него сильнее. Чуйское землетрясение 2003 г. стало причиной изменения гидрохимического состава подземных и поверхностных вод, связанного с восходящими потоками подземных вод по открывшимся тектоническим трещинам из более глубоких водоносных горизонтов. По данным гидрологов, существенно изменился гидрохимический состав подземных вод неоген-палеогенового комплекса, который в районе с. Мухор-Тархата «разбавился» – уменьшилась концентрация катионов и анионов и, как следствие, минерализация [Kats, 2005]. Очевидно, что изменения состава и минерализации подземных вод, их перераспределение после сейсмического события радикально влияют на УЭС горных пород.

По данным четырех пунктов ЗСБ (1, 2, 5, 6) с установкой АВ-МН получены максимальные значения коэффициента электрической анизотропии (A), что можно объяснить влиянием трещиноватой зоны разлома, активизированной Чуйским землетрясением и событиями афтершокового периода, к которой эти пункты наиболее близко расположены. Кроме того, на участке исследования анизотропными свойствами обладают высокоомные слои разреза. Интересен литологический состав пород, слагающих горизонты, для которых получены максимальные значения A . По скважинным данным верхний слой представлен грубообломочными гравийно-галечными породами с прослоями глин, а палеозойский фундамент слагают вулканогенно-терригенные породы. Из-за выраженной трещиноватости в этих слоях значения УЭС различны вдоль и поперек трещин. Следовательно, можно считать, что для верхнего слоя и опорного горизонта характерны более высокие значения коэффициента анизотропии, чем для среднего слоя, представленного тонкослоистыми осадками, в котором происходит более быстрое залечивание трещин.

Применение, кроме традиционно используемого УЭС, коэффициента электрической анизотропии, безусловно, расширяет информативность исследования, так как позволяет не только следить за вариациями, связанными с сейсмической активностью, но и эффективно исследовать трещиноватые разломные зоны с целью уточнения их местоположения и степени

активности [Shalaginov et al., 2018]. Ряды значений Λ также были сопоставлены с параметрами, характеризующими изменения сейсмического режима за 2007–2020 гг. (рис. 10), на основании чего установлено, что между изменениями значений Λ и сейсмической активности имеется прямая корреляция.

Значения вариаций Λ , составляющие более 100 %, связаны с периодами повышения сейсмической активности региона в 2008–2009 г., а во время второй

активизации 2013 г. они достигают 170 %. Начиная с 2015 г. вариации Λ существенно уменьшаются, но все еще в несколько раз превышают погрешности измерений (погрешность определения коэффициента анизотропии первого слоя 7–12 %, третьего – 10–14 %). По рис. 10 видно, что в ходе затухания афтершокового процесса с 2018 г. больше уменьшаются вариации для опорного горизонта разреза по сравнению с верхним слоем. Можно отметить также, что вариации

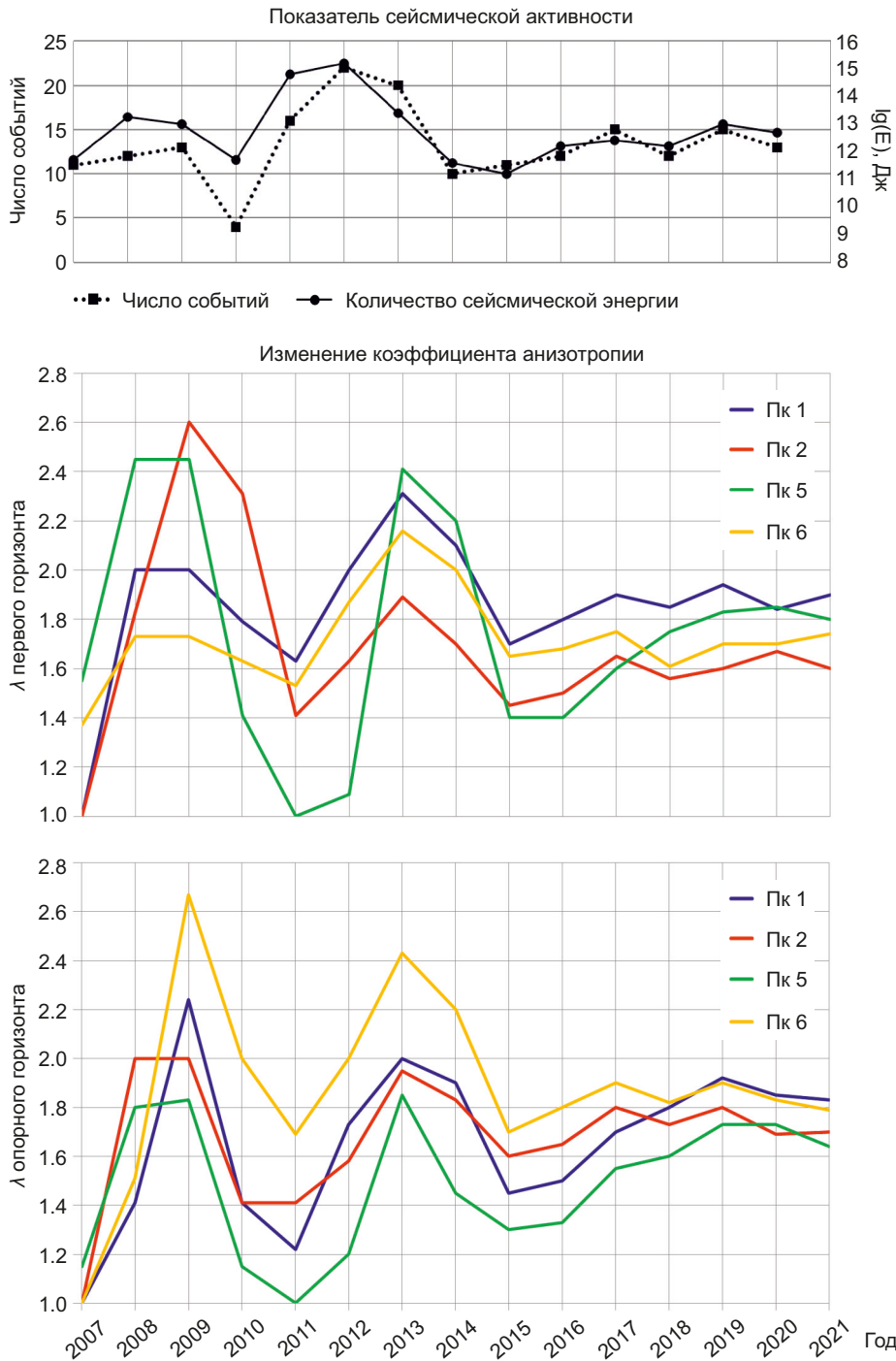


Рис. 10. Сопоставление значений коэффициента электрической анизотропии с показателями сейсмичности в период 2007–2020 гг.

Fig. 10. Comparison of the values of the electrical anisotropy coefficient with the seismicity indicators in the period 2007–2020.

коэффициента анизотропии в течение всего афтершокового периода Чуйского землетрясения существенно превышают величины вариаций УЭС.

Таким образом, весь цикл регулярных наблюдений за вариациями электрофизических параметров с 2007 по 2020 г. можно разделить на два периода:

– во временной период 2007–2014 гг. отмечается активный процесс изменения сейсмического режима исследуемой территории с двумя сильными активизациями, который проявляется в значимых вариациях как продольной проводимости, так и параметра электрической анизотропии, достигающих 100 % и более;

– начиная с 2015 г. по настоящее время наблюдается постепенное затухание афтершокового периода Чуйского землетрясения, и в этот же период происходит уменьшение вариаций электрофизических параметров, которые не превышают 20–30 %.

Уменьшение амплитуды вариаций электрофизических параметров за последние годы наблюдений можно связать также с пространственными изменениями сейсмичности в Чуйско-Курайской зоне, которые стали проследиваться с 2015 г. и усилились в 2018 г., в полной мере проявились в районе Айгулакского хребта в 2019 г. Здесь 13 сентября с интервалом в несколько минут произошли друг за другом два крупных землетрясения с $M=4.7$ ($M_L=5.5$) и с $M=4.4$ ($M_L=5.2$), за которыми последовал мощный афтершоковый процесс [Emanov et al., 2021a, 2021b]. По сейсмологическим данным отмечается существенное увеличение сейсмической активности в Айгулакском хребте. Однако расстояние от участка электромагнитных наблюдений до Айгулакского хребта в два раза больше, чем расстояние до эпицентральной зоны землетрясения 2003 г., и, соответственно, влияние сейсмичности Айгулакского хребта на вариации УЭС и Δ меньше.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регулярные наблюдения за двумя электрофизическими параметрами (УЭС и Δ), выполненные в эпицентральной зоне разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. с длительной афтершоковой последовательностью, подтверждают выводы предшествующих исследований о высокой чувствительности электромагнитного поля к изменению сейсмического режима.

Предложенная методика измерения методом ЗСБ с использованием трех приемно-генераторных установок и соответствующая методика обработки и интерпретации данных позволили наиболее надежно и точно определить параметры геоэлектрической модели среды (УЭС, мощность слоя, коэффициент электрической анизотропии), которые в дальнейшем используются для расчета вариаций, их оценки и сопоставления с изменением сейсмического режима.

Показано, что использование двух электрофизических параметров – УЭС и Δ – повышает информативность мониторинга в целом, а параметр электрической анизотропии более чувствителен по сравнению с УЭС.

Временные ряды мониторинга методом ЗСБ отражают многолетний, сложный афтершоковый процесс с сейсмическими активизациями и затишьями. Уменьшение вариаций электрофизических параметров в последние годы наблюдений связано не только с общим затуханием афтершоковой активности, но и с пространственными изменениями сейсмичности в Чуйско-Курайской зоне.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

Both authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

Both authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Antonov E.Yu., 2011. Mathematical Modeling of Quasi-Static Electromagnetic Fields in Dispersing and Magnetic Environments. PhD Thesis (Doctor of Physics and Mathematics). Novosibirsk, 334 p. (in Russian) [Антонов Е.Ю. Математическое моделирование квазистационарных электромагнитных полей в диспергирующих и магнитных средах: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2011. 334 с.].

Antonov E.Yu., Shein A.N., 2008. Improving Inversion Quality for IP-Affected TDEM Data. Russian Geology and Geophysics 49 (10), 790–802. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.01.008>.

Babushkin S.M., Nevedrova N.N., Seleznev V.S., Liseikin A.V., 2021. Electromagnetic Research in the Altai-Sayan Mountain Region. Russian Journal of Seismology 3 (2), 7–19 (in Russian) [Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н., Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Электромагнитные исследования на территории Алтае-Саянской горной области // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3. № 2. С. 7–19]. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.01>.

Bataleva E.A., Batalev V.Y., Rybin A.K., 2013. On the Question of the Interrelation between Variations in Crustal Electrical Conductivity and Geodynamical Processes. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 49, 402–410. <https://doi.org/10.1134/S1069351313030038>.

Bataleva E.A., Mukhamadeeva V.A., 2018. Complex Electromagnetic Monitoring of Geodynamic Processes in the Northern Tien Shan (Bishkek Geodynamic Test Area). Geodynamics & Tectonophysics 9 (2), 461–487 (in Russian) [Баталева Е.А., Мухамадеева В.А. Комплексный электромагнитный мониторинг геодинамических процессов Северного Тянь-Шаня (Бишкекский геодинамический полигон) // Геодинамика и тектонофизика. 2018.

T. 9. № 2. С. 461–487]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-2-0356>.

Danilenko V.N., Episkoposov K.S., Sergeev A.A., 2021. Experience of Using Time-Domain Electromagnetic Sounding in Underground Gas Storage Facilities. *Karotazhnik* 5 (311), 24–31 (in Russian) [Даниленко В.Н., Епископосов К.С., Сергеев А.А. Опыт применения метода зондирования становлением электромагнитного поля (ЗСБ) на объектах подземного хранения газа // Каротажник. 2021. № 5 (311). С. 24–31].

Deev E.V., Nevedrova N.N., Ponomarev P.V., Zol'nikov I.D., Rusanov G.G., 2012. Geoelectrical Studies of the Chuya Basin Sedimentary Fill (Gorny Altai). *Russian Geology and Geophysics* 53 (1), 92–107. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.12.007>.

Electrical Prospecting Guidelines, 1984. Land Electric Survey, Borehole Electric Survey, Mine Electric Survey, Airborne Electric Survey, Marine Electric Survey. Nedra, Leningrad, 534 p. (in Russian) [Инструкция по электроразведке. Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэро-электроразведка, морская электроразведка. Л.: Недра, 1984. 534 с.].

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Gladyshev E.A., Antonov I.A., 2021a. Aigulak Earthquake of 13.09.2019 with $M=4.7$ and Its Aftershocks in the Seismicity Structure of Chuya-Kurai Zone of Gorny Altai. Earthquakes in Russia in 2019. FRC GS RAS, Obninsk, p. 117–122 (in Russian) [Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А., Антонов И.А. Айгулакское землетрясение 13.09.2019 г. с $M=4.7$ и его афтершоки в структуре сейсмичности Чуйско-Курайской зоны Горного Алтая // Землетрясения России в 2019 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 117–122].

Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G., Durachenko A.A., Korabelshchikov D.G., Gladyshev E.A., 2021b. Altai and Sayan. Earthquakes in Russia in 2019. FRC GS RAS, Obninsk, p. 37–44 (in Russian) [Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Корабельщиков Д.Г., Гладышев Е.А. Алтай и Саяны // Землетрясения России в 2019 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 37–44].

Epov M.I., Nevedrova N.N., Antonov E.Yu., 2006. A Method for Accounting for Characteristic Distortions of the Field Formation Electromagnetic Field Curves Obtained in Seismically Active Areas. *Geophysical Bulletin* 6, 8–14 (in Russian) [Эпов М.И., Неведрова Н.Н., Антонов Е.Ю. Способ учета характерных искажений полевых кривых становлением электромагнитного поля, полученных в сейсмоактивных районах // Геофизический вестник. 2006. № 6. С. 8–14].

Goldman M.M., Kaufman A.A., 1971. Unsteady Electromagnetic Field in the Near Zone. Institute of Geology and Geophysics, Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, Novosibirsk, 48 p. (in Russian) [Гольдман М.М., Кауфман А.А. Нестационарное электромагнитное поле в ближней зоне. Новосибирск: Изд-во ИГиГ СО АН СССР, 1971. 48 с.].

Gubatenko V.P., Ogadzhanov V.A., Nazarov A.A., 2000. Monitoring the Rock Decompaction Dynamics by Electrical Prospecting Methods. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 36 (9), 799–805.

Kats V.E., 2005. Hydrogeological Peculiarities of Groundwater Conditions on the Territory of Altai Republic in 2004 (after Chuya Earthquake). *Natural Resources of Mountain (Gorny) Altai* 2, 61–65 (in Russian) [Кац В.Е. Гидрогеологические особенности состояния подземных вод на территории Республики Алтай в 2004 г. (после Чуйского землетрясения) // Природные ресурсы Горного Алтая. 2005. № 2. С. 61–65].

Khabinov O.G., Chalov I.A., Vlasov A.A., Antonov E.Yu., 2009. The System for Interpretation of EMS Transient Electromagnetic Sounding Data. In: GEO-Siberia-2009. Proceedings of the V International Scientific Congress (April 20–24, 2009). Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, p. 108–113 (in Russian) [Хабинин О.Г., Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS // ГЕО-Сибирь-2009: Материалы V Международного научного конгресса (20–24 апреля 2009 г.). Новосибирск: СГУГиТ, 2009. С. 108–113].

Lu J., Qian F., Zhao Y., 1999. Sensitivity Analysis of the Schlumberger Monitoring Array: Application to Changes of Resistivity Prior to the 1976 Earthquake in Tangshan China. *Tectonophysics* 307 (3–4), 397–405. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00101-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00101-8).

Nevedrova N.N., Epov M.I., Antonov E.Yu., Dashevskii Yu.A., Duchkov A.D., 2001. Reconstruction of the Deep Structure of the Chuya Depression of Mountain (Gorny) Altai from Electromagnetic Sounding Data. *Russian Geology and Geophysics* 42 (9), 1399–1416 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Эпов М.И., Антонов Е.Ю., Дашевский Ю.А., Дучков А.Д. Реконструкция глубинного строения Чуйской впадины Горного Алтая по данным электромагнитных зондирований // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 9. С. 1399–1416].

Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., 2011. Geoelectric Structure of Kurai Depression of Mountain (Gorny) Altai Taking into Account Tectonic Features. In: L.Ya. Erofeev, V.I. Isaev (Eds), *Geophysical Methods in Subsurface Exploration*. Publishing House of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, p. 57–60 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Санчаа А.М. Геоэлектрическое строение Курайской впадины Горного Алтая с учетом тектонических особенностей // Геофизические методы при разведке недр / Ред. Л.Я. Ерофеев, В.И. Исаев. Томск: Изд-во ТПУ, 2011. С. 57–60].

Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Shalaginov A.E., Babushkin S.M., 2019. Electromagnetic Monitoring in the Region of Seismic Activation (on the Gorny Altai (Russia) Example). *Geodesy and Geodynamics* 10 (6), 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.06.001>.

Nevedrova N.N., Shalaginov A.E., 2015. Monitoring of Electromagnetic Parameters in the Seismic Activity Zone of Mountain (Gorny) Altai. *Geophysics* 1, 31–40 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Шалагинов А.Е. Мониторинг электромагнитных параметров в зоне сейсмической

активизации Горного Алтая // Геофизика. 2015. №1. С. 31–40].

Rymarczyk T., Kłosowski G., Tchórzewski P., Cieplak T., Kozłowski E., 2019. Area Monitoring Using the ERT Method with Multisensor Electrodes. *Przegląd Elektrotechniczny* 95 (1), 153–156. <https://doi.org/10.15199/48.2019.01.39>.

Sanchaa A.M., Nevedrova N.N., Shtabel N.V., 2021. Deep Structure of the Fault Zone in the Mukhor-Tarkata Site of the Chuya Depression According to Non-Stationary Electromagnetic Sounding Data Using Three-Dimensional Modeling. *Geology and Mineral Resources of Siberia* 2 (46), 67–73 (in Russian) [Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Штабель Н.В. Глубинное строение разломной зоны на участке Мухор-Тархата Чуйской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований с использованием трехмерного моделирования // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2021. № 2 (46). С. 67–73]. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2021-2-67-73>.

Shalaginov A.E., 2017. Variations of Electrophysical Parameters from the Non-Stationary Electromagnetic Sounding Data in the Zone of Seismic Activation (Mountain (Gorny) Altai). PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Novosibirsk, 154 p. (in Russian) [Шалагинов А.Е. Вариации электрофизических параметров по данным нестационарного электромагнитного зондирования в зоне сейсмической активизации (на примере Горного Алтая): Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2017. 154 с.].

Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., 2015. Geoelectric Structure on the Site of Regular Observations of Electromagnetic Parameters in Chuya Basin Gorny Altai. *Vestnik Altajskoj Nauki* 2 (24), 310–318 (in Russian) [Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н. Геоэлектрическое строение участка регулярных наблюдений за электромагнитными параметрами в Чуйской впадине Горного Алтая // Вестник алтайской науки. 2015. № 2 (24). С. 310–318].

Shalaginov A.E., Nevedrova N.N., Shaparenko I.O., 2018. Variations in Electrophysical Parameters Estimated from Electromagnetic Monitoring Data as an Indicator of Fault Activity. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (1), 93–107 (in Russian) [Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // Геодинамика и тектофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 93–107]. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0339>.

Shaparenko I.O., Nevedrova N.N., 2018. Fault Zone Monitoring by Electrotomography (Based on Mountain (Gorny)

Altai). In: *Problems of Geodynamics and Geoecology of Inland Orogens. Proceedings of the VII International Symposium* (June 19–24, 2017). RS RAS, Bishkek, p. 439–443 (in Russian) [Шапаренко И.О., Неведрова Н.Н. Мониторинг разломных зон методом электротомографии (на примере Горного Алтая) // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: Материалы докладов VII Международного симпозиума (19–24 июня 2017 г.). Бишкек: ИС РАН, 2018. С. 439–443].

Shein A.N., 2010. Separation of Polarization and Induction Processes and Joint Inversion of Pulse Electrical Prospecting Data. Brief PhD Thesis (Candidate of Physics and Mathematics). Novosibirsk, 17 p. (in Russian) [Шейн А.Н. Разделение поляризационных и индукционных процессов и совместная инверсия данных импульсной электроразведки: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2010. 17 с.].

Sherman S.I., Bornyakov S.A., Buddo V.Yu., 1983. Areas of Dynamic Influence of Faults (Modelling Results). Nauka, Novosibirsk, 112 p. (in Russian) [Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.].

Stanica D., Stanica M., 2007. Electromagnetic Monitoring in Geodynamic Active Areas. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 4 (1), 99–107.

Vanyan L.L., 1997. *Electromagnetic Sounding*. Nauchny Mir, Moscow, 218 p. (in Russian) [Ваньян Л.Л. Электромагнитные зондирования. М.: Научный мир, 1997. 218 с.].

Zheltenkova N.V., Gagarin V.E., Koshurnikov A.V., Nabiev I.A., 2020. Regime Geocryological Observations of the High Altitude Mountain Passes of Tien Shan. *Arctic and Antarctica* 3, 25–43 (in Russian) [Желтенкова Н.В., Ггарин В.Е., Кошурников А.В., Набиев И.А. Режимные геокриологические наблюдения на высокогорных перевалах Тянь-Шаня // Арктика и Антарктика. 2020. № 3. С. 25–43]. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.3.33535>.

Zolnikov I.D., 2010. The Role of Glaciations and Glacial Super-Floods in the Geological Structure of Sedimentary Complexes of the Upper Half of the Neopleistocene in the Altai Mountains and the Altai Plain. Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Novosibirsk, 32 p. (in Russian) [Зольников И.Д. Роль оледенений и гляциальных суперпаводков в геологическом строении осадочных комплексов верхней половины неоплейстоцена Горного Алтая и Приалтайской равнины: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 2010. 32 с.].