



VARIATIONS IN ELECTROPHYSICAL PARAMETERS ESTIMATED FROM ELECTROMAGNETIC MONITORING DATA AS AN INDICATOR OF FAULT ACTIVITY

A. E. Shalaginov, N. N. Nevedrova, I. O. Shaparenko

A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract: In the regions of high seismic activity, investigations of fault zones are of paramount importance as such zones can generate seismicity. A top task in the regional studies is determining the rates of activity from the data obtained by geoelectrical methods, especially considering the data on the faults covered by sediments. From a practical standpoint, the results of these studies are important for seismic zoning and forecasting of natural and anthropogenic geodynamic phenomena that may potentially occur in the populated areas and zones allocated for construction of industrial and civil objects, pipelines, roads, bridges, etc. Seismic activity in Gorny Altai is regularly monitored after the destructive 2003 Chuya earthquake ($M=7.3$) by the non-stationary electromagnetic sounding with galvanic and inductive sources of three modifications. From the long-term measurements that started in 2007 and continue in the present, electrical resistivity and electrical anisotropy are determined. Our study aimed to estimate the variations of these electrophysical parameters in the zone influenced by the fault, consider the intensity of the variations in comparison with seismicity indicators, and attempt at determining the degree of activity of the faults. Based on the results of our research, we propose a technique for measuring and interpreting the data sets obtained by a complex of non-stationary sounding modifications. The technique ensures a more precise evaluation of the electrophysical parameters. It is concluded that the electric anisotropy coefficient can be effectively used to characterize the current seismicity, and its maximum variations, being observed in the zone influenced by the fault, are characteristic of the fault activity. The use of two electrophysical parameters enhances the informativeness of the study.

Key words: non-stationary electromagnetic sounding with galvanic and inductive sources; electrical resistivity tomography (ERT); anisotropy of electrical conductivity; electromagnetic monitoring; activity of fault zones

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: K.Zh. Seminsky

Received: July 18, 2017
Revised: September 13, 2017
Accepted: October 18, 2017

For citation: 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. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0339.

Для цитирования: Шалагинов А.Е., Неведрова Н.Н., Шапаренко И.О. Вариации электрофизических параметров по данным электромагнитного мониторинга как индикатор активности разломных зон // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 1. С. 93–107. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0339.

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОНИТОРИНГА КАК ИНДИКАТОР АКТИВНОСТИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН

А. Е. Шалагинов, Н. Н. Неведрова, И. О. Шапаренко

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация: В регионах с высокой сейсмической активностью повышенный интерес к исследованию разломных зон связан с тем, что они могут являться сейсмогенерирующими, поэтому определение степени их активности с помощью методов геоэлектрики является актуальной задачей, особенно для нарушений, перекрытых осадочными отложениями. С практической точки зрения эти исследования важны для задач сейсмозонирования, прогнозирования возможных природных и техногенных геодинамических явлений в заселенных районах, при строительстве промышленных и гражданских объектов, газопроводов, дорог, мостов и т.д. Регулярные наблюдения в сейсмоактивной зоне Горного Алтая после разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. с $M=7.3$ выполняются методами нестационарного электромагнитного зондирования с использованием трех модификаций с гальваническими и индуктивными источниками. Для анализа многолетних измерений, которые были начаты в 2007 г. и продолжаются по настоящее время, привлечены два электрофизических параметра – удельное электрическое сопротивление и коэффициент электрической анизотропии. Целью работы является оценка вариаций этих параметров в зоне влияния разлома, сопоставление их интенсивности с показателями сейсмичности, что дает возможность определить степень активности выявленных разломных нарушений. В результате исследования предложена методика измерений и интерпретации данных комплекса модификаций нестационарного зондирования, с помощью которой можно наиболее точно оценить значения электрофизических параметров. Вывод заключается в том, что коэффициент электрической анизотропии может быть эффективно использован для характеристики текущей сейсмичности, а его максимальные вариации, которые наблюдаются в зоне влияния разлома, характеризуют его активность. Использование двух электрофизических параметров увеличивает информативность исследования.

Ключевые слова: нестационарное электромагнитное зондирование с гальваническим и индуктивным источниками; электротомография; анизотропия электропроводности; электромагнитный мониторинг; активность разломных зон

1. ВВЕДЕНИЕ

Работы выполняются в афтершоковый период Чуйского землетрясения 2003 г. с $M_5=7.3$, очаговая зона которого охватила Чуйскую и Курайскую депрессии Горного Алтая и их ближайшее горное обрамление. Землетрясение сопровождалось длительным афтершоковым процессом, во время которого активные периоды чередовались с затишьями. При повышении активности происходят сейсмические события разного энергетического класса, включая крупные с магнитудой 4–5 [Emanov et al., 2015]. Участок исследования расположен в западной части Чуйской впадины Горного Алтая, в районе пос. Мухор-Тархата. С 2007 г. на этом участке группой электромагнитного мониторинга ИНГГ СО РАН проводятся структурные и регулярные наблюдения тремя модификациями метода зондирования становлением электромагнитного поля (ЗС). ЗС относится к одному из глубинных методов переменного тока с контролируруемыми источниками и в геоэлектрических условиях межгорных впадин

и позволяет получить геоэлектрические параметры осадочного заполнения и верхней части фундамента до глубин в несколько километров [Nevedrova, Epov, 2012]. В последнее десятилетие быстро развиваются аппаратные, методические, программно-алгоритмические средства этого метода, что способствует повышению точности измерений и производительности полевых работ, расширению круга решаемых задач [Goldman et al., 2015; Barsukov, Fainberg, 2016; Mogilatov, Zlobinskiy, 2017].

Современные исследования палеосейсмичности на территории Чуйско-Курайской зоны указывают на множественные повторения здесь сильных землетрясений, что свидетельствует о необходимости выявления новых возможных сейсмогенерирующих разломов [Rogozhin et al., 2008; Lunina, Gladkov, 2015; Deev et al., 2017]. Следует отметить тот факт, что даже определение местоположения разломного нарушения, скрытого рыхлыми осадками, вызывает определенные трудности. В этом случае актуально привлечение методов геофизики. В частности, с помощью электромагнитных методов с кон-

тролируемым источником в последнее время на территории крупных межгорных впадин Горного Алтая выявлен целый ряд межблоковых разломных нарушений [Nevdrova et al., 2017]. На участке Мухор-Тархата в результате обработки площадных данных ЗС построена геоэлектрическая модель, выявлено глубинное строение разломной зоны [Nevdrova, Shalaginov, 2015]. Далее по данным электромагнитного мониторинга показана ее активность, характеризующаяся значимыми вариациями двух электрофизических параметров – удельного электрического сопротивления (УЭС) и коэффициента электрической анизотропии (λ).

Для реализации полевых работ тремя модификациями метода ЗС с гальваническими и индуктивными установками предложена методика измерений [Shalaginov, 2017]. Для генераторной линии АВ длиной 910 м заземляющими электродами служили обсадные колонны двух самоизливающихся скважин (скв. 1, 2). Комплексные измерения выполнялись: а) установкой «соосные петли» (Q, q) со стороны генераторного контура (Q) в 200 м, а приемного контура (q) в 100 м; б) приемным одновитковым контуром квадратной формы со стороной 200 м (установка АВ-q) с целью уточнения строения; в) заземленной электрической линией MN длиной 200 м (установка АВ-MN). Соосная установка обеспечивает высокую локальность зондирования, именно по ее данным построена базовая изотропная геоэлектрическая модель. По данным установки АВ-MN возможно определение коэффициента электрической анизотропии.

Измерения методом ЗС реализуются новой электроразведочной аппаратурой «Байкал МЭРС-Т» (Геофизическая служба СО РАН, г. Новосибирск), в которую входят регистраторы и коммутатор тока ГТИ-200. Аппаратура предназначена для многокомпонентной регистрации переходных процессов. Применение аппаратуры «Байкал МЭРС-Т» в полевых условиях с широким временным интервалом регистрации и возможностью измерять слабые сигналы в доли мкВ позволяет продлить кривую зондирования до более поздних времен и определять параметры глубокозалегающих горизонтов с высокой достоверностью. Каждый год измерения выполняются в одно и то же время и одним и тем же комплектом измерительно-генераторного оборудования. Сила тока в генераторной петле достигает 40 А.

Методика проведения топографических работ с использованием GPS-приемников Garmin и базовой станции с контроллерами ProMark 3 обеспечивает точность определения координат пунктов в среднем 1 м в плане и 2 м по высотной привязке.

С целью определения приповерхностного строения разломной структуры, первоначально выяв-

ленной по данным ЗС, привлечен метод электротомографии [Hennig et al., 2008; Strack, 2010; Perrone et al., 2014; Gélis et al., 2016]. Для проведения многоэлектродных измерений (электротомографии) используется современная электроразведочная аппаратура на постоянном токе «СКАЛА 48», разработанная в ИНГГ СО РАН. В 2014–2016 гг. были выполнены измерения по восьми профилям протяженностью 235, 350 и 460 м (рис. 1). В результате двумерной и трехмерной инверсии полевых данных электротомографии получены геоэлектрические характеристики верхней части разломной зоны, ее геометрические размеры, интервал удельного электрического сопротивления. Можно отметить, что чаще всего для зон активных разломов наблюдается значительное понижение значений УЭС относительно вмещающей среды, и, кроме того, они могут отличаться своими анизотропными электрическими свойствами, что подтверждено целым рядом полевых экспериментов и теоретическими расчетами. На рис. 1 показаны пункты ЗС и профили электротомографии на топографической карте участка исследования.

Разломная трещиноватая зона на участке Мухор-Тархата выделена по комплексу геолого-геофизических данных в осадочных отложениях и фундаменте геологического массива и, судя по значительным вариациям электрофизических параметров, относится к активным структурам.

Таким образом, основной целью работы является оценка вариаций УЭС и λ , сопоставление их интенсивности для разных пунктов измерений, размещенных по площади участка, с учетом расстояния до разломной зоны, для обоснования ее активности.

2. МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПОЛЕВЫХ ДАННЫХ. ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УЧАСТКА МУХОР-ТАРХАТА

Интерпретация данных нестационарного электромагнитного зондирования основана на решении обратных задач, когда в каждом регулярном пункте восстанавливается геоэлектрическая модель и затем определяются вариации УЭС и λ для каждого слоя модели. Чуйская впадина заполнена сложнопостроенной толщей континентальных кайнозойских отложений, ее геологический разрез хорошо изучен, определен литологический состав и возраст основных стратиграфических подразделений [Devyatkin, 1981].

Разработанная методика интерпретации соответствует методике измерений [Shalaginov, 2017]. В первую очередь рассматриваются полевые данные ЗС с индуктивной установкой «соосные петли».

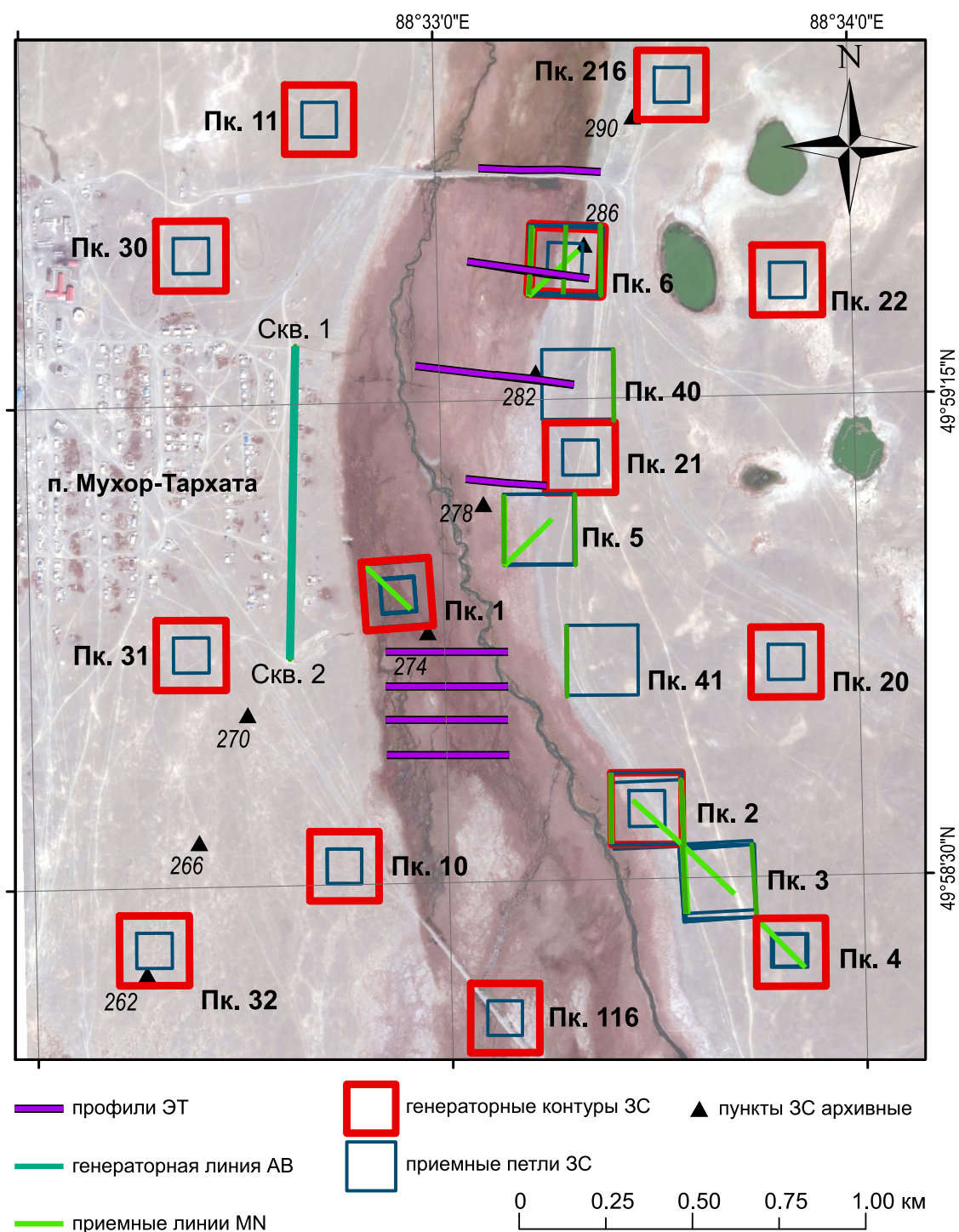


Рис. 1. Схема размещения пунктов комплексных измерений ЗС и профилей электротомографии на участке Мухор-Тархата.

Fig. 1. Schematic map showing the locations of the sites of complex measurements based on TEM-sounding and ERT profiles in the Mukhor-Tarkhata zone.

Именно по данным этой установки в результате интерпретации с учетом геологической информации для участка Мухор-Тархата получена базовая трехслойная геоэлектрическая модель с верхним высокоомным и средним низкоомным слоями, которые залегают на опорном горизонте (фундамен-

те) (рис. 2). Из анализа и сопоставления полевых, теоретических кривых и геоэлектрических моделей, полученных по данным с установкой «соосные петли», следует, что небольшие искажения полевых кривых ЗС на ранних и поздних временах практически не влияют при определении основных

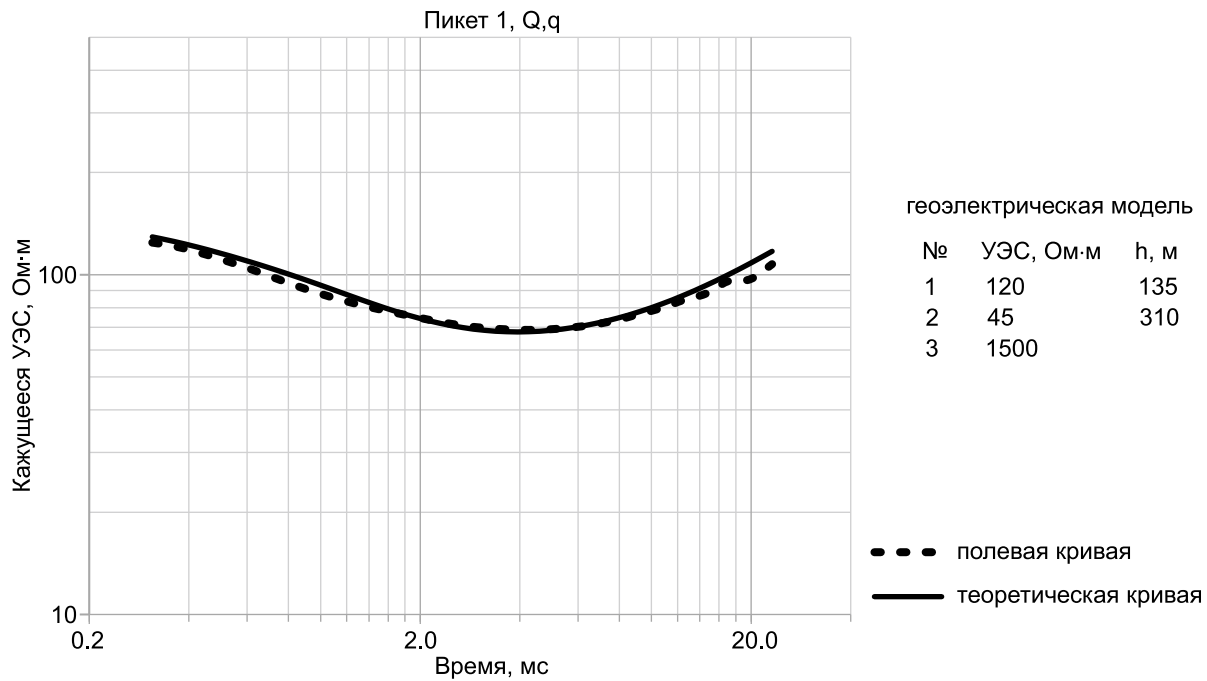


Рис. 2. Пример интерпретации данных ЗС с установкой «соосные петли».

Fig. 2. An example of the TEM-sounding interpretation with the ‘coaxial loops’ installation.

геоэлектрических параметров разреза. Верхний слой представлен галечниками, валунниками, песками с УЭС в 800–1000 Ом·м; средний горизонт слагают в основном глины с примесью песчаников, и его УЭС имеет достаточно низкие значения в интервале 35–50 Ом·м, УЭС опорного горизонта достигает 2000 Ом·м, этот горизонт слагают палеозойские разновозрастные отложения. Интерпретация всего объема данных ЗС с индуктивными установками осуществлялась с помощью интерактивного программного комплекса моделирования и инверсии «EMS» [Khabinov et al., 2009]. Дополнительные сведения о строении участка получены с использованием данных второй модификации ЗС с установкой АВ-q (рис. 3). Можно отметить, что данные с установкой АВ-q более искажены по сравнению с данными соосных установок. Путем сопоставления полевых и теоретических кривых ЗС с установкой АВ-q выявлены характерные искажения, которые связаны в основном с поздней стадией становления. В частности, видно (рис. 3), что правая ветвь полевой кривой ЗС 1 проходит под углом, значительно большим, чем у правой асимптоты для горизонтально-слоистой модели. Такой тип искажений наблюдается и для других полевых данных ЗС, полученных в межгорных впадинах Горного Алтая, и по результатам моделирования обусловлен блоковым строением фундамента и в некоторых случаях вызванной поляризацией, что было рассмотрено в работе [Еров et al., 2006]. Со-

поставление данных зондирования установками Q, q и АВ-q в одном пункте показало, что геоэлектрические модели для перечисленных установок неплохо совпадают по мощности слоев и несколько отличаются по удельному электрическому сопротивлению; например, для ЗС 1 различается УЭС первого горизонта. Это можно объяснить различной конфигурацией использованных установок и, соответственно, разным распространением поля в среде. И на последнем этапе интерпретации в результате обработки данных ЗС с гальванической установкой АВ-MN, после того как основная изотропная модель была построена и верифицирована, получен коэффициент электрической анизотропии с помощью специализированной программы «Rubai» [Nevedrova, Dashevsky, 2010]. Погрешность определения параметров геоэлектрической модели в интерпретационном временном интервале по данным установок Q, q и АВ-q не превышает 4 %, а по данным установки АВ-MN – 7 %.

Использование современной аппаратуры, а также предложенной авторами методики измерений методом ЗС с тремя приемно-генераторными установками и соответствующей методики обработки и интерпретации данных в конечном счете позволило наиболее надежно определить параметры геоэлектрической модели, такие как УЭС, мощность слоев, коэффициент электрической анизотропии, которые в дальнейшем используются для расчета

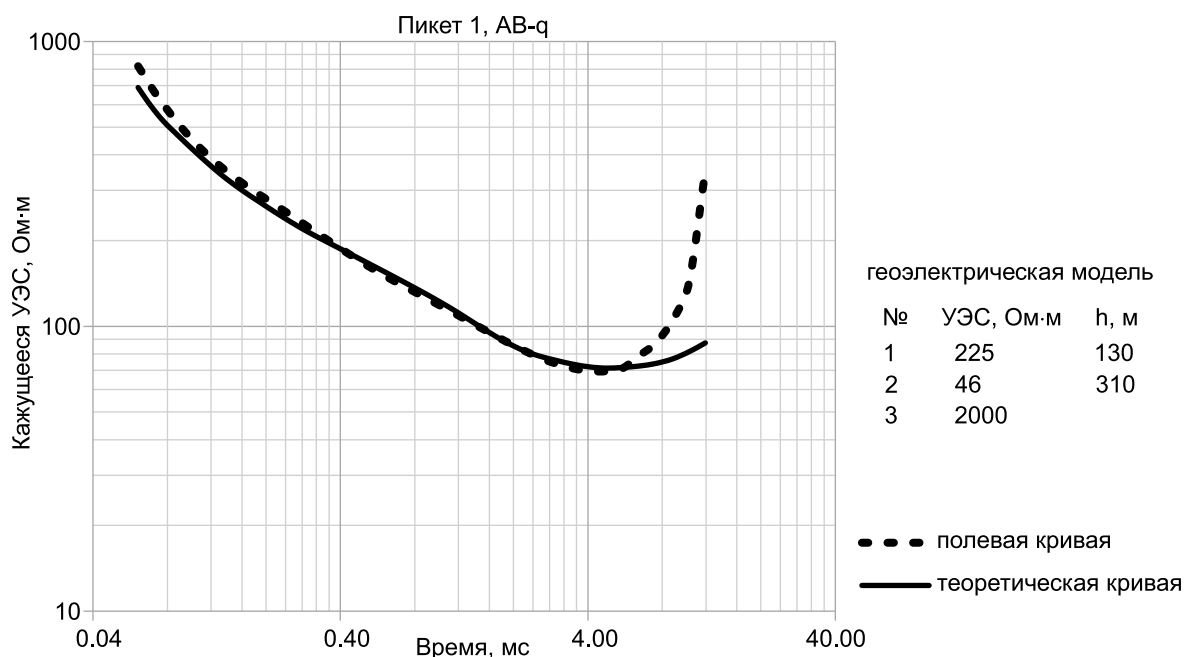


Рис. 3. Пример интерпретации данных ЗС с установкой АВ-q.

Fig. 3. An example of the TEM-sounding interpretation with the AB-q installation.

вариаций и их сопоставления с показателями сейсмической активности.

В качестве характеристик сейсмичности были выбраны число землетрясений и количество выделившейся сейсмической энергии в районе Чуйско-Курайской зоны за каждый год [Emanov A.A. et al., 2015; Emanov A.F. et al., 2016]. По результатам интерпретации полевых данных всех модификаций ЗС было выяснено, что анизотропными характеристиками обладают высокоомные верхний и опорный горизонты, а выраженные вариации УЭС наблюдаются для среднего проводящего слоя.

В предшествующих работах показано, что вариации геоэлектрических параметров существенно зависят не только от сейсмического воздействия, но и от строения участка исследования, положения разломных структур относительно пунктов электромагнитных измерений, поэтому важно уточнить его структурные геоэлектрические особенности, получить более подробные данные о разломных нарушениях [Nevdrova, Epov, 2012; Nevdrova et al., 2016].

Для выявления разломной зоны на участке Мухор-Тархата, определения ее параметров и слежения за изменениями этих параметров выполнены площадные измерения методом ЗС с соосными установками, регулярные наблюдения ЗС тремя модификациями и электротомография по системе профилей. По данным площадных ЗС разлом выделяется погруженным блоком фундамента практически в центральной части участка, вытянутым с

юга на север и соотносящимся с течением р. Мухор. Изначально этот разлом был обоснован уникальными геологическими данными. На основе анализа цифровой модели рельефа по данным радарной съемки (SRTM) и космоснимков LANDSAT известный геолог д.г.-м.н. И.Д. Зольников разделил территорию Чуйской впадины на несколько крупных геоморфологических сегментов. Граница между двумя из этих сегментов проходит непосредственно через участок Мухор-Тархата по р. Мухор и свидетельствует о наличии межблокового разлома [Zol'nikov, 2010].

Для подтверждения продолжения разлома в верхнюю часть разреза применен метод электротомографии постоянным током. В ходе полевых работ в разломной зоне этим методом была использована стандартная установка Шлюмберже. Шаг между электродами составлял 5 м, что обеспечило необходимую детальность при построении разрезов (рис. 4) [Furman et al., 2007; Hennig et al., 2008]. Для слежения за изменениями геоэлектрических параметров по профилю № 2 измерения методом электротомографии были выполнены в 2016 и 2017 гг. Интерпретация полевых данных проводилась с помощью программных средств Res2DInv (Geotomo Software) [Loke, 2015], ERTlab [Morelli, LaBrecque, 1996].

Разломная зона на геоэлектрических разрезах рис. 4 хорошо выделяется в их центральной части зоной с пониженными значениями УЭС (около 100 Ом·м) относительно вмещающих отложений.

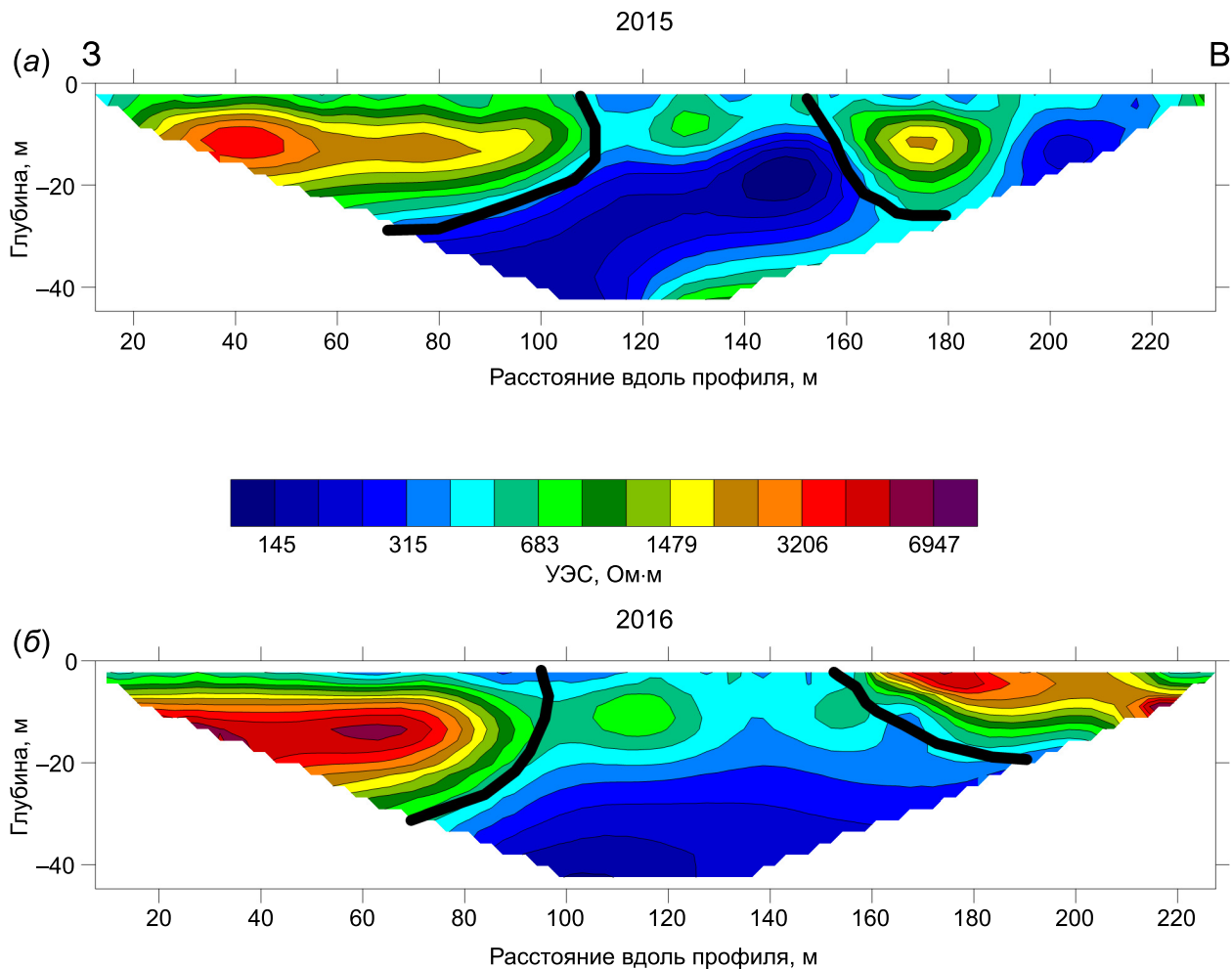


Рис. 4. Геоэлектрические разрезы на основе данных электротомографии участка Мухор-Тархата по результатам двумерной инверсии: *a* – за 2015 г., *б* – за 2016 г. Черные линии – примерные границы зоны разлома. Профиль № 2.

Fig. 4. The ERT profiles for the Mukhor-Tarkhata zone based on two-dimensional inversion: *a* – 2015, *б* – 2016. Black lines roughly outline the fault zone. Profile No. 2.

Видны изменения УЭС в верхней и нижней части разреза с течением времени. В 2016 г. УЭС выделенной проводящей зоны повысилось, кроме того до глубины 20 м получены более протяженные и более высокоомные блоки по сравнению с 2015 г.

В принципе, учитывая опыт применения электротомографии на других участках межгорных впадин, можно считать, что разломные структуры выделяются значимым понижением УЭС относительно вмещающих пород, на которое влияет изменение сейсмического режима исследуемой территории. В зонах менее активных в настоящее время разломов получены достаточно высокие значения УЭС. В частности, в районе пос. Бельтир в Чуйской впадине для выделенной межблоковой разломной структуры значения УЭС составляют 400–500 Ом·м, что объясняется в первую очередь низкой активностью разлома по данным монито-

ринга методом ВЭЗ и развитием многолетней мерзлоты [Nevedrova et al., 2017].

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ЗС

По результатам обработки мониторинговых данных ЗС за 2007–2016 гг. получены временные ряды значений УЭС, продольной проводимости, параметра электрической анизотропии и вариации этих параметров для разных слоев геоэлектрического разреза.

Регулярные наблюдения за вариациями УЭС с установкой «соосные петли» осуществлялись в двух пунктах – ПК 1 и 4. Поскольку мощности слоев геоэлектрической модели в этих пунктах отличаются, для более корректного сопоставления были рассчитаны значения продольной проводимости.

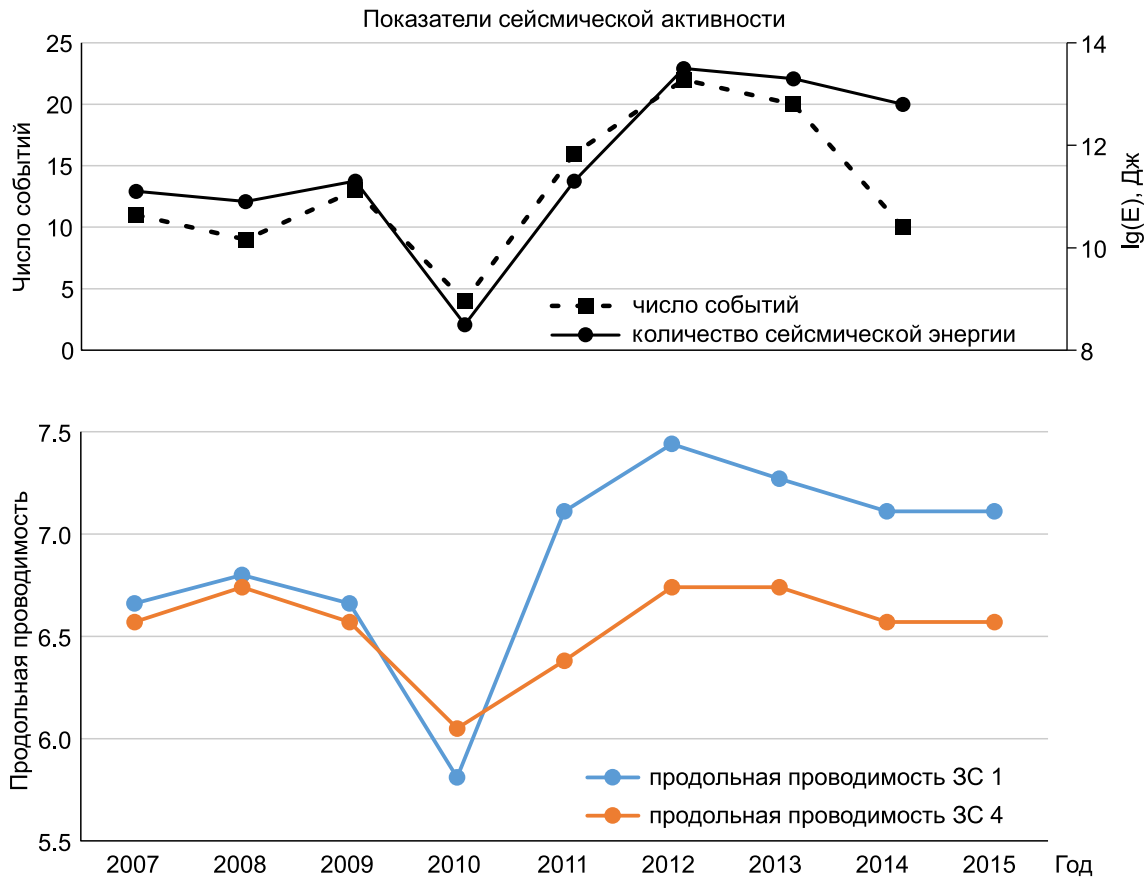


Рис. 5. Сопоставление значений продольной проводимости 2-го слоя ЗС ПК 1 и ЗС ПК 4 с «соосными установками» с показателями сейсмической активности.

Fig. 5. The values of longitudinal conductivity in the 2nd layer of TEM-sounding of Point 1 and Point 4 with the 'coaxial loops' installations in comparison with seismicity indicators.

Реакция на сейсмическое воздействие для 2-го проводящего слоя разреза рассмотрена по двум геоэлектрическим характеристикам: УЭС и продольной проводимости, так как эти характеристики по-разному отражают изменение сейсмического режима. Временные ряды продольной проводимости (S) ПК 1 и 4 были сопоставлены с характеристиками сейсмичности (рис. 5). Установлено, что в периоды сейсмических активизаций 2008–2009 гг. и 2012–2013 гг. наблюдалась прямая корреляция изменения продольной проводимости с показателями сейсмической активности (коэффициент корреляции 0.8–0.9 для разных пунктов). Меньшие вариации по данным ПК 4 можно объяснить, привлекая данные о размещении разломной зоны. Пункт ПК 4 расположен на расстоянии ~1000 м от нее, в отличие от пункта ПК 1, расположенного непосредственно в зоне ее влияния. Можно сделать вывод, что параметр продольной проводимости отражает изменение сейсмического режима, как и УЭС, но сопоставление более корректно, чем для УЭС, так как учтена разница в мощностях проводящего го-

ризонта ПК 1 и 4. Кроме того, показано, что значения продольной проводимости в периоды сейсмических активизаций в зоне влияния разлома повышаются максимально.

Также представляет интерес параметр продольной проводимости, определенный по данным двух разных установок ЗС. Из сопоставления продольной проводимости второго слоя по данным установки «соосные петли» и АВ-q в одном пункте измерений (ПК 1) с характеристиками сейсмического режима (рис. 6) видно, что амплитуда изменения этого параметра по данным установки АВ-q меньше, чем по данным «соосной установки». Поскольку ПК 5 расположен достаточно близко к ПК 1, его данные также были добавлены в сопоставление.

Данные установки АВ-q также коррелируют с характеристиками сейсмического режима, но они менее выраженные, амплитуды значений меньше. Следовательно, для электромагнитного мониторинга параметров УЭС и продольной проводимости оптимально использовать установку «соосные петли».

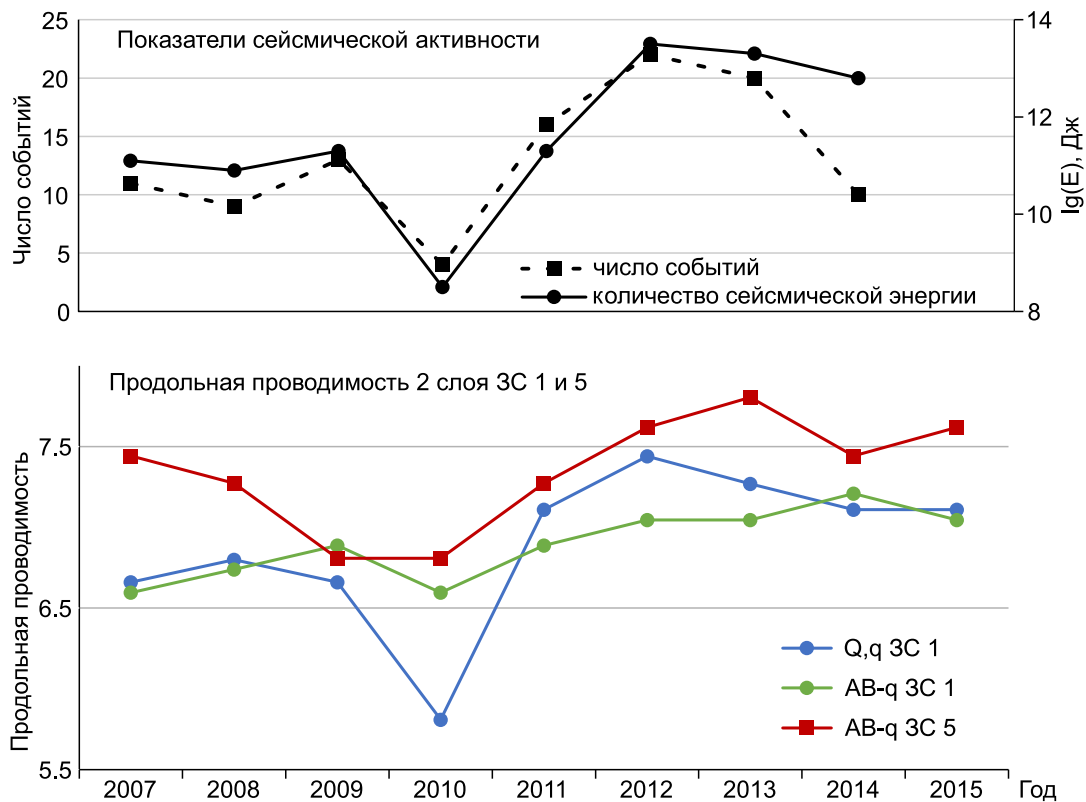


Рис. 6. Сопоставление значений продольной проводимости 2-го горизонта по данным ЗС ПК 1 с установкой Q, q и по данным ЗС ПК 1 и 5 с установками АВ-q с показателем сейсмической активности.

Fig. 6. The values of longitudinal conductivity in the 2nd layer of TEM-sounding of Point 1 and TEM-sounding of Point 4 with the Q, q installation and the data on TEM-sounding of Point 1 and Point 5 with the AB-q installations in comparison with the seismicity indicator.

Известно, что сигнал установки АВ-MN существенно зависит от анизотропии проводимости, поэтому при измерении электрических компонент поля при гальваническом возбуждении и регистрации сигнала можно исследовать электрическую анизотропию массива горных пород [Gubatenko et al., 2000]. В результате интерпретации данных ЗС с этой установкой в шести пунктах (ПК 1, 2, 3, 4, 5, 6) определены значения коэффициента электрической анизотропии для каждого слоя геоэлектрической модели и построены временные ряды значений и вариаций λ высокоомных горизонтов разреза – верхнего и опорного.

По данным четырех пунктов – ПК 1, 2, 5, 6 – с установкой АВ-MN получены максимальные значения коэффициента электрической анизотропии (λ), что можно объяснить влиянием зоны разлома, к которой эти пункты наиболее близко расположены. По данным ПК 3 и 4, пункты которых находятся на большем расстоянии от разломной зоны (~1000 м), значения коэффициента электрической анизотропии и его вариации меньше. Чуйское землетрясение сопровождается длительным, пока еще незавершенным афтершоковым процессом, кото-

рый характеризуется затишьями и сейсмическими активизациями с возможностью сильных землетрясений. Значения λ для наиболее чувствительных пунктов (ПК 1, 2, 5, 6) достигают 1.7 во время существенного понижения сейсмичности в 2010 г. и повышаются во время активизаций неоднозначно для разноглубинных горизонтов разреза, в отложениях верхнего горизонта по данным ПК 5, ПК 2. Например, λ достигает значений 2.4, 2.6, а для опорного горизонта по данным ПК 1, ПК 6 λ составляет соответственно 2.2, 2.6. По данным менее чувствительных пунктов ПК 3 и ПК 4, максимальные значения λ составляют 1.3–1.6.

Ряды значений λ сопоставлены с рядами параметров, характеризующими сейсмичность, изменения сейсмического режима афтершокового периода (рис. 7). Выполненное сопоставление показывает, что между изменениями значений λ и сейсмической активности имеется прямая корреляция (коэффициент корреляции составляет от 0.6 до 0.9 для разных пунктов).

По данным площадной съемки ЗС на участке Мухор-Тархата построены блоковые 3D модели подошвы первого слоя и кровли фундамента (опор-

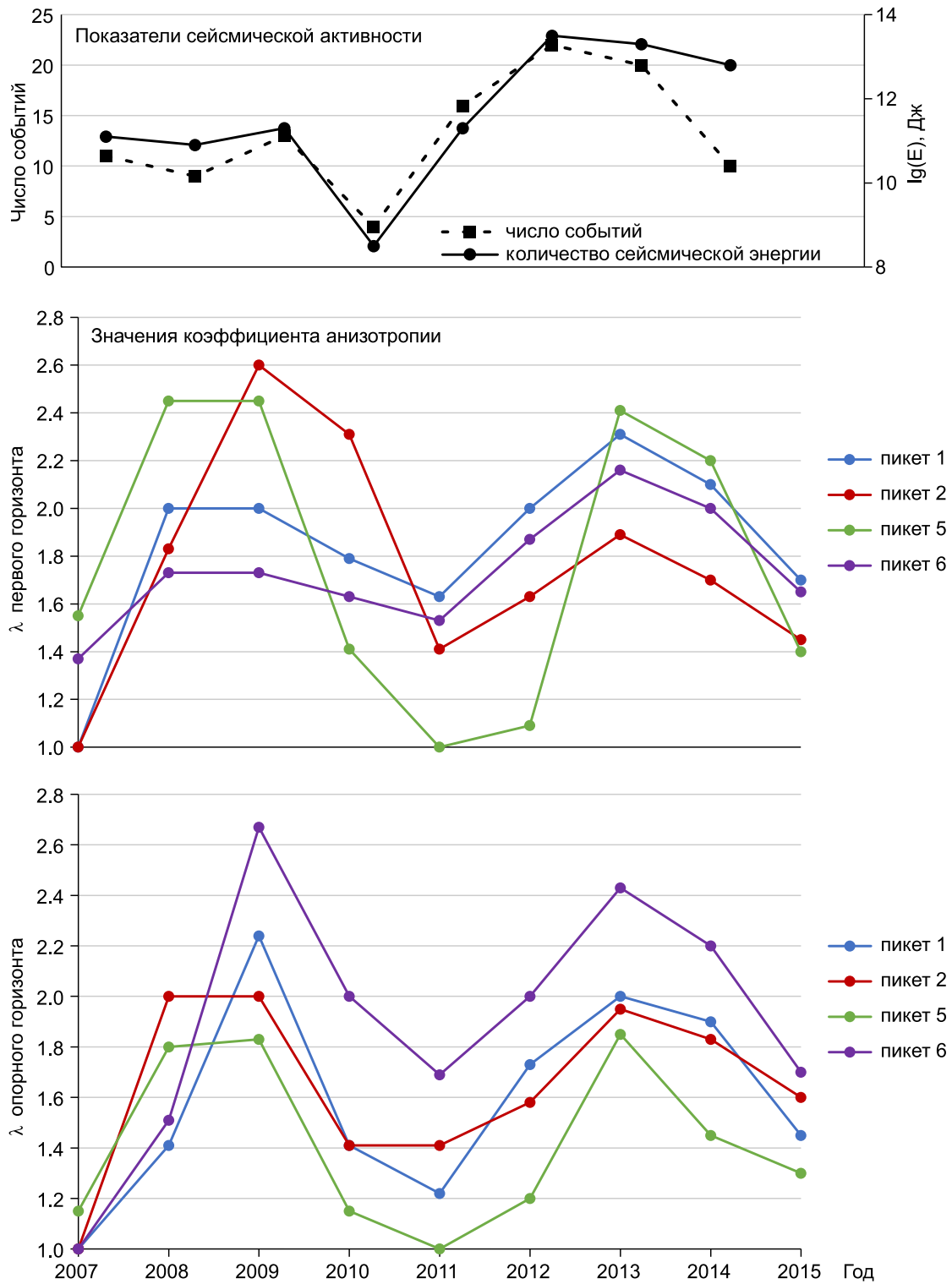


Рис. 7. Сопоставление значений коэффициента электрической анизотропии ЗС ПК 1, 2, 5, 6 с показателями сейсмичности.

Fig. 7. The values of the electrical anisotropy coefficient (TEM-sounding of Points 1, 2, 5, and 6) in comparison with seismicity indicators.

ного горизонта), в пределах выделенных блоков обозначена интенсивность вариаций коэффициента электрической анизотропии в процентах для периодов максимальной сейсмической активности

(2009 г., 2013 г.) и относительного сейсмического затишья (2010 г., 2016 г.) (рис. 8). Видно, что под воздействием сейсмических событий активизируются разные блоки разломной зоны.

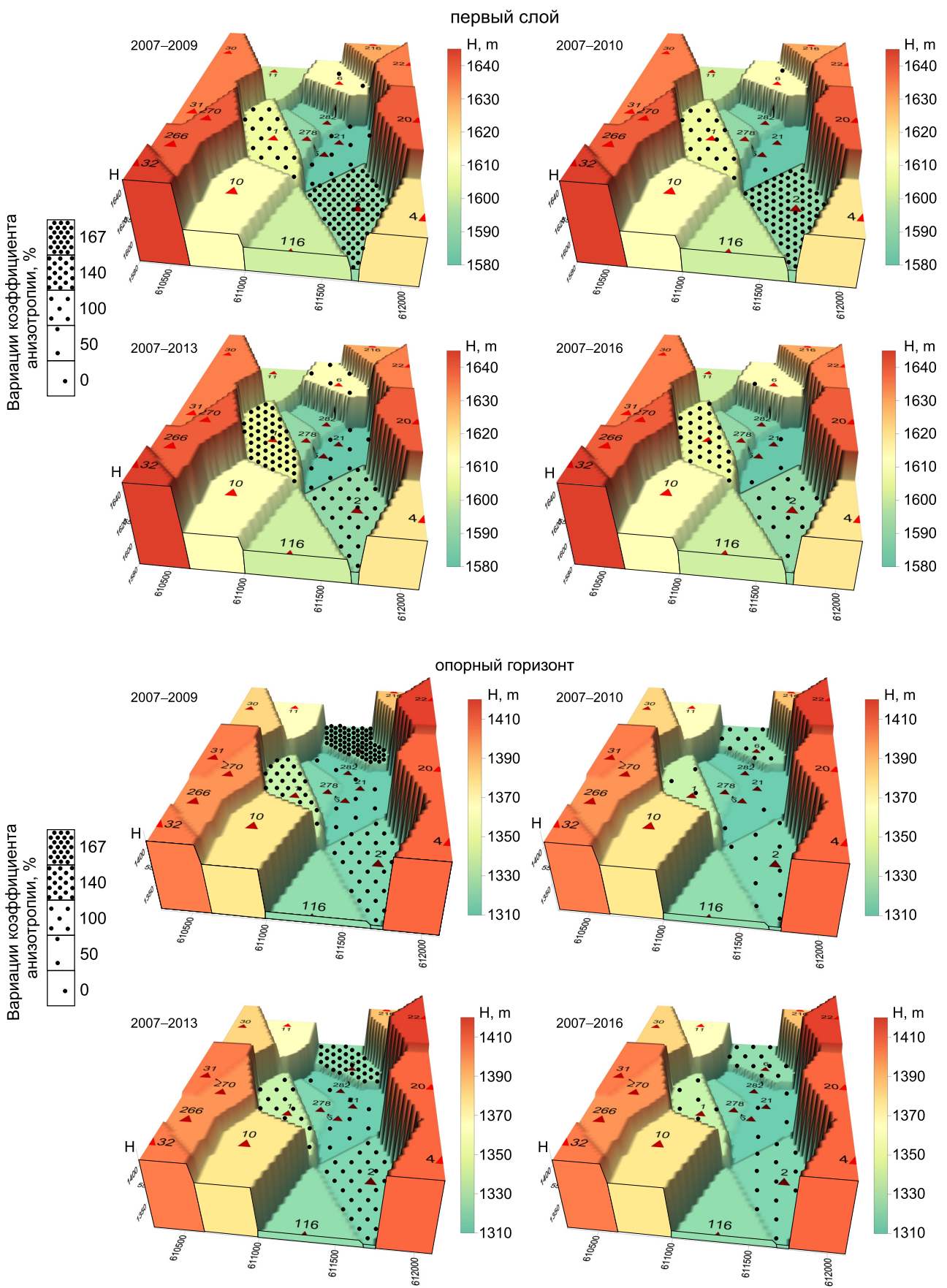


Рис. 8. Блоковая 3D модель подошвы первого слоя и поверхности фундамента с зонами максимальных вариаций коэффициента электрической анизотропии за период 2007–2016 гг.

Fig. 8. The block 3D model showing the bottom of the first layer and the top of the foundation with the zones of maximum variations in the electrical anisotropy coefficient for the period from 2007 to 2016.

В целом на рисунке видно, что области максимальных вариаций электрической анизотропии приурочены к погруженным блокам фундамента, по которым трассируется зона разлома и которые отмечены на рис. 8 оттенками зеленого цвета. Значения вариаций λ более 100 % связаны с периодами повышения сейсмической активности региона в 2009 г., в 2013 г. и достигают 170 %. В периоды относительного сейсмического затишья (2010 г. и 2016 г.) вариации составляют 60–90 %, т.е. примерно в два раза меньше. Можно отметить также, что вариации коэффициента анизотропии в афтершоковый период Чуйского землетрясения существенно превышают величины вариаций УЭС. Вариации λ для двух анизотропных горизонтов разреза (верхнего и опорного) по данным ЗС ПК 1, 2, 5 и 6, которые расположены в зоне разлома, в несколько раз больше вариаций УЭС, не превышающих 20 %.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Высокая чувствительность электромагнитного поля к изменению сейсмического режима, подтвержденная полевыми и модельными экспериментами, выражается значимыми вариациями удельного электрического сопротивления и коэффициента электрической анизотропии [Sobolev, 1993; Stanica D., Stanica M., 2007; Bataleva et al., 2015; Bragin, Mukhamadeeva, 2009].

Регулярные наблюдения за двумя электрофизическими параметрами (УЭС и λ), выполненные в эпицентральной зоне разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. с длительной афтершоковой последовательностью, подтверждают выводы предшествующих исследований. Афтершоковые события влияют на состояние массива горных пород и интенсивность вариаций электрофизических параметров. В этой работе показано, что привлечение, кроме традиционно используемого УЭС, коэффициента электрической анизотропии увеличивает информативность электромагнитного мониторинга, 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.

Как показал полевой опыт, в межгорных впадинах электрические сопротивления вдоль и поперек направления трещин в разломной зоне существенно различаются, среда ведет себя подобно одноосной анизотропной среде и коэффициент анизотропии может быть намного больше единицы. По результатам обработки многолетних данных нестационарных электромагнитных зондирований

участка Мухор-Тархата получено, что коэффициент электрической анизотропии можно использовать для характеристики трещиноватых разломных структур, перекрытых рыхлыми осадками.

На участке исследования выявлены пункты, наиболее чувствительные к сейсмическому воздействию, по данным которых получены максимальные вариации УЭС и λ . Эти пункты расположены в непосредственной близости от разломного нарушения, в зоне его влияния. Отсюда следуют два вывода: о возможности оптимизации размещения регулярных пунктов наблюдений на участке, а также, с учетом аналогичных результатов на других участках впадин Горного Алтая, о возможности слежения за степенью активности выявленной разломной зоны по интенсивности вариаций электрофизических параметров.

В работе показано, что метод электротомографии на постоянном токе также можно использовать для мониторинга геоэлектрических параметров приповерхностных отложений, в том числе и в активных разломных зонах. По комплексу данных нестационарных зондирований и электротомографии активность разломов проявляется от глубин до фундамента (по данным ЗС) и до дневной поверхности (по данным ЭТ). Результаты повторных измерений электротомографии подтверждают существование значимых вариаций УЭС в верхнем слое до глубин 50–100 м.

К важным выводам можно отнести тот факт, что по результатам электромагнитного мониторинга выделены чувствительные к сейсмическим событиям интервалы на разных глубинах в геологическом массиве. Значимые вариации УЭС, коррелирующие с сейсмическими активизациями 2008–2009 гг. и 2012–2013 гг. афтершокового периода, наблюдаются во втором проводящем горизонте, в то время как максимальные вариации коэффициента электрической анизотропии отмечаются в первом и третьем высокоомных горизонтах в эти же временные интервалы. Таким образом, установлено, что каждый параметр имеет разную чувствительность к сейсмическому воздействию и каждый из них характеризует свой интервал разреза. Параметр электрической анизотропии более чувствителен по сравнению с УЭС к изменению сейсмического режима и может характеризовать его изменения.

Можно считать, что оба параметра УЭС и λ актуальны при проведении электромагнитного мониторинга, так как разные сейсмоактивные регионы могут существенно отличаться по своему геологическому строению и не всегда есть возможность выполнять измерения в разломных зонах. В частности, в Селенгинской депрессии Байкальской рифтовой системы измерения методом вертикального электр...

трического зондирования выполнены на участке с мощностью осадочной толщи более 1 км и к прогнозируемому признаку были отнесены аномалии интегральной проводимости разреза, предшествующие текущим землетрясениям [Nevedrova, Erov, 2012].

Вместе с тем в статье предложен новый подход к измерениям и интерпретации данных электромагнитного мониторинга. С использованием данных трех установок нестационарного электромагнитного зондирования на основе решения обратной задачи получены наиболее точные количествен-

ные оценки пространственно-временного распределения УЭС и коэффициента анизотропии для характеристики сейсмического режима и показано, что λ можно считать индикатором напряженного состояния трещиноватой разломной зоны.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования поддержаны грантом РФФИ 17-05-00654А.

6. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Barsukov P.O., Fainberg E.B., 2016. Marine transient electromagnetic sounding of deep buried hydrocarbon reservoirs: principles, methodologies and limitations. *Geophysical Prospecting* 65 (3), 840–858. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12416>.
- Bataleva E.A., Batalev V.Y., Rybin A.K., 2015. Interrelation of conductivity, seismic velocities and the seismicity for Central Tien Shan lithosphere. *Litosfera (Lithosphere)* (5), 81–89 (in Russian) [Баталева Е.А., Баталев В.Ю., Рыбин А.К. Взаимосвязь аномалий электропроводности, скоростных характеристик и режима сейсмичности литосферы Центрального Тянь-Шаня // *Литосфера*. 2015. № 5. С. 81–89].
- Bragin V.D., Mukhamadeeva V.A., 2009. The study of the variations in the anisotropy of electrical resistance in the crust in the Bishkek geodynamic polygon by electromagnetic methods. In: *Geodynamics of intra-continental orogens and geocological problems. Proceedings of the IV International Symposium. Bishkek–Moscow*, p. 74–84 (in Russian) [Брагин В.Д., Мухамедеева В.А. Изучение вариаций анизотропии электрического сопротивления в земной коре на территории Бишкекского геодинамического полигона электромагнитными методами // *Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы: Материалы IV Международного симпозиума. Бишкек–Москва*, 2009. С. 74–84].
- Deev E.V., Turova I.V., Borodovskiy A.P., Zolnikov I.D., Oleszczak L., 2017. Unknown large ancient earthquakes along the Kurai fault zone (Gorny Altai): new results of palaeoseismological and archaeoseismological studies. *International Geology Review* 59 (3), 293–310. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1258675>.
- Devyatkin E.V., 1981. Cenozoic of Inner Asia (Stratigraphy, Geochronology, Correlation). Nauka, Moscow, 196 p. (in Russian) [Девяткин Е.В. Кайнозой Внутренней Азии (стратиграфия, геохронология, корреляция). М.: Наука, 1981. 196 с.].
- Emanov A.A., Leskova E.V., Emanov A.F., Fateev A.V., Kolesnikov Yu.I., 2015. The epicentral zone of the September 27, 2003 Chuva earthquake, M=7.3. Observations in 2012–2013. In: *Earthquakes of Russia in 2013. GS RAS, Obninsk*, p. 99–102 (in Russian) [Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В., Колесников Ю.И. Эпицентральная область Чуйского землетрясения 27.09.2003 г. с M=7.3. Наблюдения 2012–2013 гг. // *Землетрясения России в 2013 году. Обнинск: ГС РАН*, 2015. С. 99–102].
- Emanov A.F., Emanov A.A., Leskova E.V., Podkorytova V.G., Durachenko A.A., Korabelshchikov D.G., Churashev S.A., Goncharov V.N., Fateev A.V., 2016. Altai and Sayan. In: *Earthquakes of Russia in 2014. GS RAS, Obninsk*, p. 30–37 (in Russian) [Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Коробельщиков Д.Г., Чурашев С.А., Гончаров В.Н., Фатеев А.В. Алтай и Саяны // *Землетрясения России в 2014 году. Обнинск: ГС РАН*, 2016. С. 30–37].
- Erov M.I., Nevedrova N.N., Antonov E.Yu., 2006. The method for considering the characteristic distortions in the field transient electromagnetic sounding curves obtained in seismically active regions. *Geofizicheski Vestnik (Geophysical Bulletin)* (6), 8–14 (in Russian) [Эров 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].
- Furman A., Ferrre T.P.A., Heath G.L., 2007. Spatial focusing of electrical resistivity surveys considering geologic and hydrologic layering. *Geophysics* 72 (2), F65–F73. <https://doi.org/10.1190/1.2433737>.
- Gélis C., Noble M., Cabrera J., Penz S., Chauris H., Cushing E.M., 2016. Ability of high-resolution resistivity tomography to detect fault and fracture zones: application to the Tournemire experimental platform, France. *Pure and Applied Geophysics* 173 (2), 573–589. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1110-1>.
- Goldman M., Mogilatov V., Haroon A., Levi E., Tezkan B., 2015. Signal detectability of marine electromagnetic methods in the exploration of resistive targets. *Geophysical Prospecting* 63 (1), 192–210. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12151>.
- Gubatenko V.P., Ogadzhyanov 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.
- Hennig T., Weller A., Moller M., 2008. Object orientated focussing of geoelectrical multielectrode measurements. *Journal of Applied Geophysics* 65 (2), 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2008.04.007>.

- 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: The V International Scientific Congress. Siberian State University of Geosciences and Technologies, Novosibirsk, p. 108–113 (in Russian) [Хабинов О.Г., Чалов И.А., Власов А.А., Антонов Е.Ю. Система интерпретации данных зондирования методом переходных процессов EMS // ГЕО-Сибирь-2009: V Международный научный конгресс. Новосибирск: Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 2009. С. 108–113].
- Loke M.H., 2015. Geotomo Software Pty Ltd. Available from: <http://www.geotomosoft.com>.
- Lunina O.V., Gladkov A.S., 2015. Seismically induced clastic dikes as a potential approach for the estimation of the lower-bound magnitude/intensity of paleoearthquakes. *Engineering Geology* 195, 206–213. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.06.008>.
- Mogilatov V.S., Zlobinskiy A.V., 2017. Universal software for electrical prospecting by transient. *Geofizika (Geophysics)* (1), 45–55 (in Russian) [Мозилатов В.С., Злобинский А.В. Универсальное математическое обеспечение зондирования становлением // Геофизика. 2017. № 1. С. 45–55].
- Morelli G., LaBrecque D.J., 1996. Advances in ERT inverse modeling. *European Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 1 (2), 171–186.
- Nevedrova N.N., Dashevsky O.Yu., 2010. Software algorithmic means for interpreting galvanic and inductive electromagnetic sounding data in anisotropic media models. In: B.G. Mikhailenko, M.I. Eпов (Eds.), *Methods for solving direct and inverse problems of seismology, electromagnetism, and experimental studies in the problems of studying geodynamic processes in the crust of the Earth's upper mantle*. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, p. 271–277 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Дашевский О.Ю. Программно-алгоритмические средства интерпретации данных гальванических и индукционных электромагнитных зондирований в анизотропных моделях сред // Методы решения прямых и обратных задач сейсмологии, электромагнетизма и экспериментальные исследования в проблемах изучения геодинамических процессов в коре верхней мантии Земли / Ред. Б.Г. Михайленко, М.И. Эпов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2010. С. 271–277].
- Nevedrova N.N., Deev E.V., Ponomarev P.V., 2017. Fault structures and their geoelectric parameters in the epicentral zone of the 27 September 2003 Chuya earthquake (Gorny Altai) from resistivity data. *Russian Geology and Geophysics* 58 (1), 123–132. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.021>.
- Nevedrova N.N., Eпов M.I., 2012. Electromagnetic monitoring in seismically active regions of Siberia. *Geofizicheskii Zhurnal (Geophysical Journal)* 34 (4), 209–223 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Эпов М.И. Электромагнитный мониторинг в сейсмоактивных районах Сибири // Геофизический журнал. 2012. Т. 34. № 4. С. 209–223].
- Nevedrova N.N., Rokhina M.G., Shalaginov A.E., Sanchaa A.M., 2016. Analysis of long-term observations by method of non-stationary electromagnetic sounding (on the example of the seismoactive zone of Gorny Altai). *Mining Informational and Analytical Bulletin* (12), 190–212 (in Russian) [Неведрова Н.Н., Рохина М.Г., Шалагинов А.Е., Санчаа А.М. Анализ многолетних наблюдений методом нестационарного электромагнитного зондирования (на примере сейсмоактивной зоны Горного Алтая) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 190–212].
- Nevedrova N.N., Shalaginov A.E., 2015. Monitoring of electromagnetic parameters in the zone of seismic activation in Gorny Altai. *Geofizika (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].
- Perrone A., Lapenna V., Piscitelli S., 2014. Electrical resistivity tomography technique for landslide investigation: a review. *Earth-Science Reviews* 135, 65–82. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.04.002>.
- Rogozhin E.A., Ovsyuchenko A.N., Marakhanov A.V., 2008. Major earthquakes of the Southern Gornyi Altai in the Holocene. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 44 (6), 469–486. <https://doi.org/10.1134/S1069351308060037>.
- Shalaginov A.E., 2017. Variations of Electrophysical Parameters from the Non-Stationary Electromagnetic Sounding Data in the Zone of Seismic Activation (Gorny Altai). PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 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: ИНГГ СО РАН, 2017. 154 с.].
- Sobolev G.A., 1993. *Fundamentals of Earthquake Prediction*. Nauka, Moscow, 312 p. (in Russian) [Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 312 с.].
- Stanica D., Stanica M., 2007. Electromagnetic monitoring in geodynamic active areas. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 4 (1), 99–107.
- Strack K.M., 2010. Vozoff's influence on LOTEM for hydrocarbon applications. In: ASEG Extended Abstracts 2010: 21st Geophysical Conference. Sydney, p. 1–4.
- Zol'nikov I.D., 2010. The Role of Glaciations and Glacial Super Floods in the Geological Structure of Sedimentary Complexes in the Upper Half of the Neo-Pleistocene in Gorny Altai and the Prialtai Plain. Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 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: ИНГГ СО РАН, 2010. 32 с.].



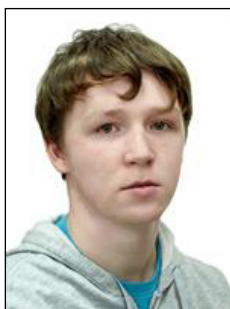
Александр Евгеньевич Шалагинов, канд. геол.-мин. наук, н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия
✉ e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru

Aleksander E. Shalaginov, Candidate of Geology and Mineralogy, Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia
✉ e-mail: ShalaginovAE@ipgg.sbras.ru



Нина Николаевна Неведрова, докт. геол.-мин. наук, в.н.с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru

Nina N. Nevedrova, Doctor of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: NevedrovaNN@ipgg.nsc.ru



Илья Олегович Шапаренко, инженер
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия
e-mail: ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru

Ilya O. Shaparenko, Engineer
A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia
e-mail: ShaparenkoIO@ipgg.sbras.ru