

И. О. Шапаренко^{1}, Н. Н. Неведрова¹*

Возможности мониторинга на участках с разломными структурами Горного Алтая методом электротомографии

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
* e-mail: shaparenkoio@ipgg.sbras.ru

Аннотация. В статье представлены результаты мониторинга методом электротомографии в районе Горного Алтая. Геофизический мониторинг районов повышенной сейсмичности в первую очередь проводится сейсмическими методами. Однако известно, что электромагнитные поля высоко чувствительны к изменению напряженно-деформированного состояния среды. Проведена серия ежегодных измерений методом электротомографии по одному профилю, проходящему через разломную зону. По результатам интерпретации данных показаны возможности метода электротомографии для мониторинга разломной зоны. Сделаны выводы о взаимосвязи между сейсмичностью района и изменением УЭС.

Ключевые слова: Горный Алтай, разломная зона, мониторинг, электротомография

I. O. Shaparenko^{1}, N. N. Nevedrova¹*

Capabilities of monitoring in areas with fault structures of the Altai Mountains using electrical resistivity tomography

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Abstract. The article presents the results of monitoring using the electrical tomography method in the Altai Mountains region. Geophysical monitoring of areas of high seismicity is primarily carried out using seismic methods. However, it is known that electromagnetic fields are highly sensitive to changes in the stress-strain state of the medium. A series of annual measurements were carried out using the electrical tomography method along one profile passing through the fault zone. Based on the results of data interpretation, the capabilities of the electrical tomography method for monitoring the fault zone are shown. Conclusions were drawn about the relationship between the seismicity of the area and changes in resistivity.

Keywords: Gorniy Altai, fault zone, monitoring, electrical resistivity tomography

Введение

На территории Горного Алтая специалистами лаборатории электромагнитных полей ИНГГ СО РАН проводятся ежегодные полевые работы методами комплексом методов геоэлектрики в том числе привлекается электротомография (ЭТ). Актуальность обусловлена необходимостью наблюдений геофизическими методами за развитием опасных явлений, вызванных геодинамическими процессами (землетрясениями, оползнями) в сейсмоактивных заселенных регионах.

Мониторинг — это регулярные наблюдения для контроля, оценки и прогноза состояния окружающей среды [1]. Безусловно, в задачи мониторинга входят не только результаты наблюдений - собранные данные, но и их обработка, интерпретация, анализ.

Для геофизического мониторинга актуальны разные методы: сейсмические, гравиметрические, геохимические, геотермические; используются спутниковые системы наблюдения за деформацией (GPS, Радар inSar), гидрологический контроль за уровнем, дебитом, температурой воды в скважинах, водоемах.

В регионах повышенной сейсмичности в первую очередь применяется сейсмический мониторинг. Обычно это сеть равномерно распределенных сейсмических датчиков (приемников). Цели данного мониторинга довольно обширны: избежать рисков разрушения зданий и сооружений [2], выявить причины, вызывающие геодинамические события региона [3]. Используются и другие геофизические методы, например, магнитотеллурические [4]; слежение за концентрацией почвенного радона [5].

Электромагнитный мониторинг является важной составляющей из-за высокой чувствительности электромагнитных полей к изменениям напряженно-деформированного состояния горных пород [6]. Обработка данных мониторинга производится в два этапа. Вначале выполняется оценка качества измерений, создание и пополнение базы данных, пригодных для дальнейшей интерпретации. Второй этап индивидуален для каждого из привлеченных электромагнитных методов, выполняется одномерная или 2-3D интерпретация в зависимости от выбранной съемки, выбор информативных параметров, расчет их вариаций. В зарубежной практике мониторинг методом электротомографии используется для изучения оползней [7].

Для электромагнитных наблюдений в сейсмоактивных районах проводится совместный анализ сейсмичности и вариаций электромагнитных параметров для установления связи между ними с целью разработки прогнозных критериев. Аномальные электромагнитные вариации могут быть использованы в качестве индикаторов изменения напряженного состояния геологической среды.

Результаты

В задачи мониторинга входит как накопление данных регулярных наблюдений, так и их интерпретация, анализ результатов. Если рассмотреть ретроспективно как выполняется интерпретация данных активного мониторинга на постоянном токе можно выделить два направления. Чаще всего рассчитывают вариации кажущегося удельного сопротивления. В качестве примера можно привести многолетний эксперимент на территории Гармского полигона (Таджикистан) с использованием дипольных зондирований с разносами в 5-10 км, далее с привлечением МГД-генератора разносы были увеличены до 40 км. В результате была установлена связь вариаций кажущегося УЭС, достигающих 20 %, с землетрясениями в радиусе до 15 км от пункта наблюдений. В целом перед событием за 2-3 месяца наблюдалось уменьшение сопротивлений, которое затем постепенно

восстанавливалось [8]. Аналогичные явления наблюдались в Китае по данным ВЭЗ с разносами до 3 км.

В ИНГГ СО РАН был предложен другой подход, основанный на решении обратных задач, т.е. вначале восстанавливается геоэлектрическая модель в пункте наблюдений для каждого регулярного измерения и затем рассчитываются вариации геоэлектрических параметров этой модели. Электромагнитный мониторинг разломных структур Горного Алтая проводится в ИНГГ СО РАН с 2004-го года после крупного Чуйского землетрясения ($M=7,3$). Вначале основными методами мониторинга являлись вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и зондирование становлением поля (ЗСБ) в нескольких модификациях.

С развитием аппаратных и интерпретационных средств метода электротомографии его также стали применять для регулярных наблюдений на участках с разломными структурами Горного Алтая, начиная с 2012 года. В настоящее время, кроме Чуйской межгорной впадины, к объектам исследования относятся и разломы Уймонской впадины. В каждой из этих депрессий есть профили ЭТ, на которых измерения проводятся регулярно.

Рассмотрим данные электротомографии, полученные в зоне разлома на участке Мухор-Тархата в Чуйской впадине. В качестве примера выбран профиль 3, так как на нем разломная зона проявляется ярче всего. Точность позиционирования электродов контролируется двумя способами: первый – выставленные на местности пункты из камней (для центра и краев профиля); второй – GPS с точностью до 5 м. На рисунке 1 приведены результаты двумерной инверсии полевых данных ЭТ за 5 лет измерений. Хорошо видно, что в центральной части разрезов за разные годы зона разлома выделяется пониженными значениями УЭС относительно вмещающей среды. Её соответствие разломной структуре подтверждается геологическими данными [9].

Анализ распределения геоэлектрических параметров разрезов за 2015-2016 годы показывает, что видны изменения УЭС как в их верхней, так и нижней части. В частности, в 2016 году до глубины в 20 м в пределах разломной зоны получены более протяженные и высокоомные блоки по сравнению с 2015 г, УЭС вмещающих пород также повысилась. Наблюдения в 2017, 2018 и 2021 годах показывают изменение УЭС всего разреза. В 2017 году произошло вынужденное смещение профиля. Для совместного анализа изменений УЭС в разломных зонах и сейсмического режима территории привлечены показатели сейсмической активности Чуйско-Курайской [10] (Рисунок 2).

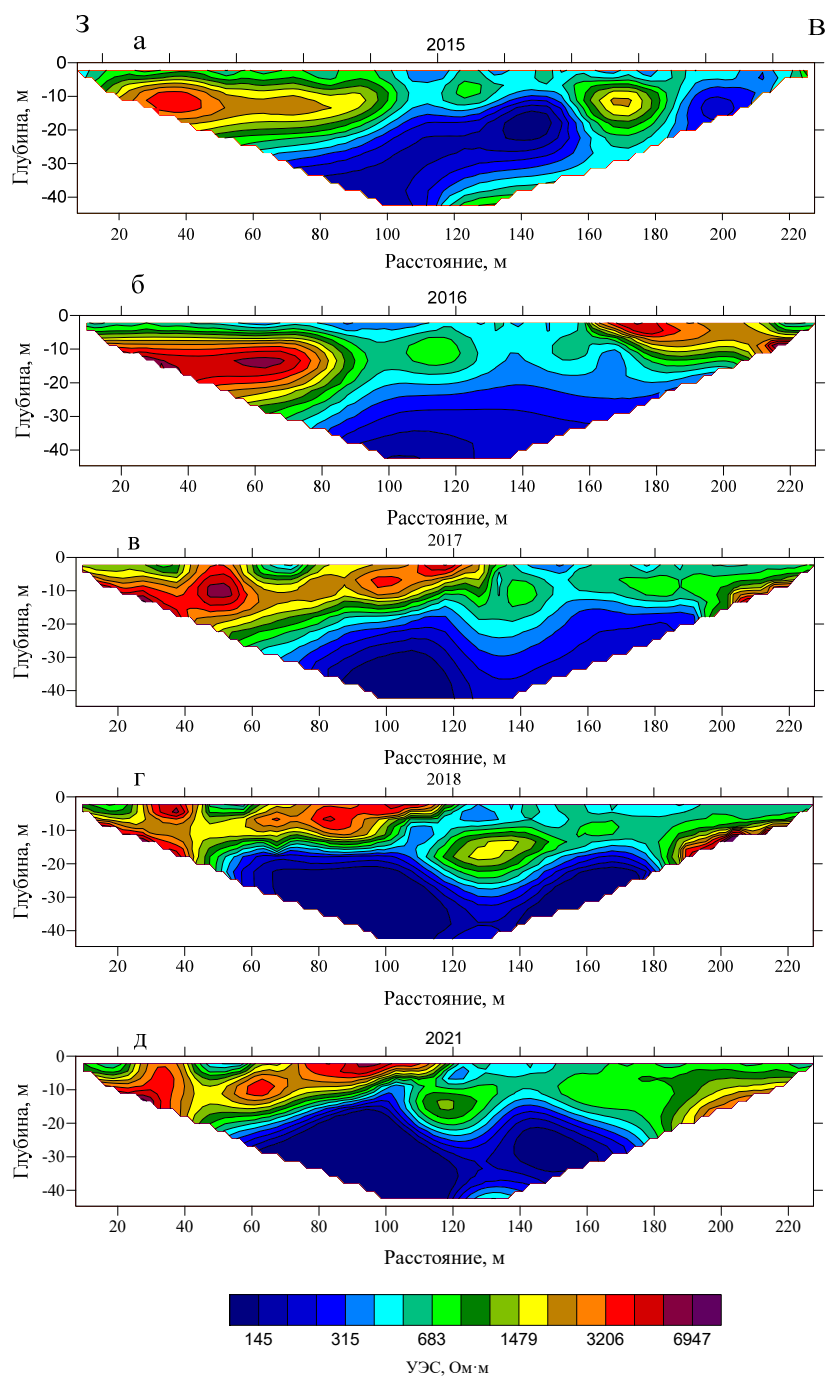


Рис. 1. Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии на участке Мухор-Тархата (профиль 3); а - за 2015 год, б - за 2016 год, в - за 2017 год, г - за 2018 год, д – за 2021. Программа Res2DInv.

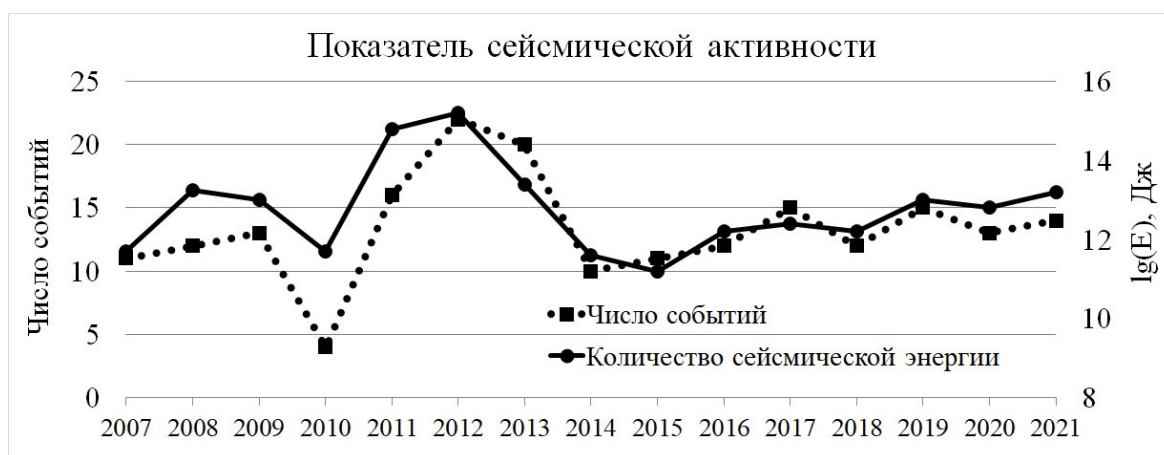


Рис. 2. Показатель сейсмической активности в районе п. Мухор-Тархата за разные годы [11]

Чтобы получить зависимость изменения УЭС от показателей сейсмической активности рассмотрим для примера данные ЭТ за 2015 и 2016 годы. Согласно рисунку 2 в эти годы число событий и количество сейсмической энергии увеличилось.

Для оценки изменений геоэлектрических параметров были выбраны и сопоставлены разрезы в интервале профиля от 60 до 190 м. Этот интервал включает выделенный разлом и зону его влияния на вмещающую среду.

На рисунке 3 представлен разностный разрез в указанном интервале между данными 2016 и 2015 годов. Формула для вычисления разностного разреза следующая:

$$\frac{B-A}{A} * 100\%,$$

где В – grid результата инверсии за 2016 год, А – grid результата инверсии за 2015 год. То есть, получена разность между значениями УЭС в узлах сетки инверсии. В верхней части рисунка 3а, б показаны сами разрезы за 2015, 2016 гг. в заданном интервале по результатам инверсии, а на рисунке 3в – разностный разрез.

Разностный разрез показывает относительное изменение УЭС в каждой точке сетки. Видно, что в целом в разломной зоне УЭС в 2016 г. увеличилось относительно значений 2015 г. Среднее изменение УЭС разломной зоны составляет ~ 20 % (без учета высокоомной аномалии в верхней части разреза в интервале от 160 по 190 м, в пределах которой наблюдается повышение УЭС в 6-8 раз).

В данном случае, при увеличении сейсмической активности в 2016 г. УЭС в зоне разлома по данным электротомографии увеличивается.

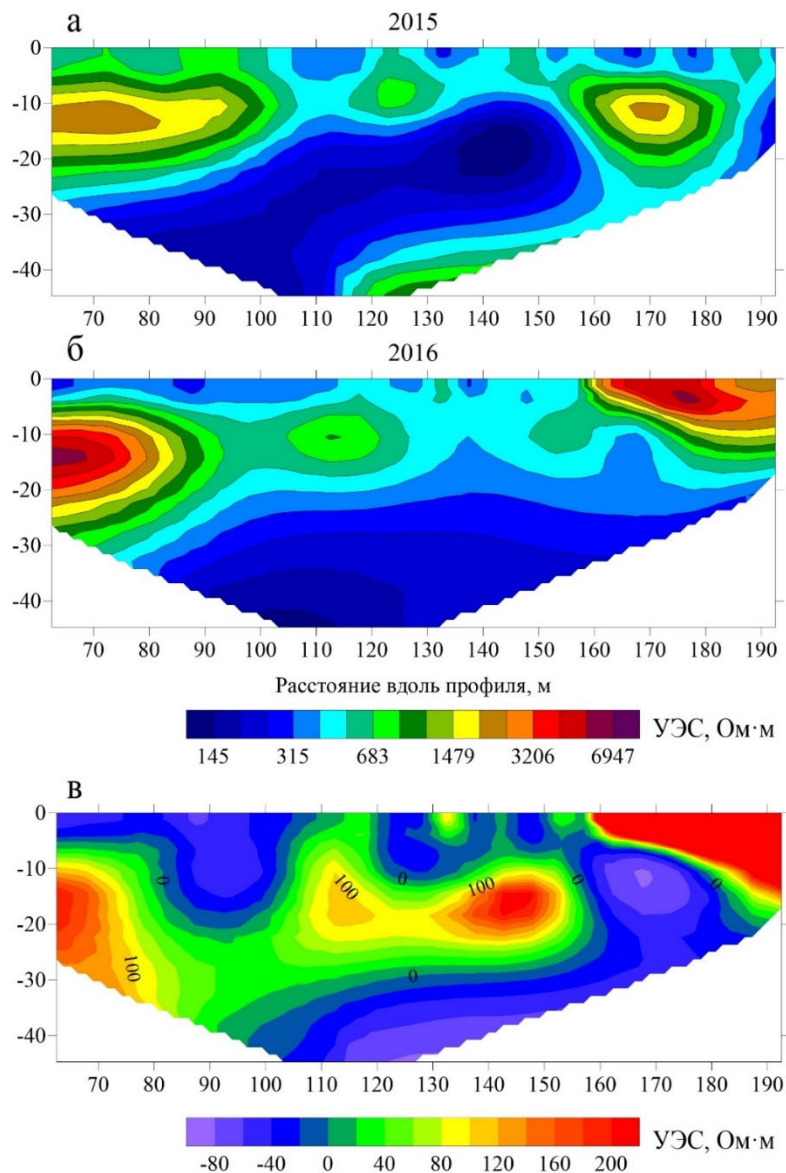


Рисунок 3 – Геоэлектрические разрезы за 2015 (а) и 2016 (б) годы в интервале профиля от 70 до 190 м. Разностный разрез результатов инверсии 2016-2015 гг (в).

Заключение

Метод электротомографии может быть использован для мониторинга УЭС в зонах активных разломов. Применение метода электротомографии для мониторинга имеет ряд трудностей, связанных с точностью повторения заземления электродов, а также с необходимостью часто делать измерения на одном профиле, что не всегда возможно. Однако, изучение изменения УЭС во времени позволяет получить дополнительную информацию о разломной зоне. За исследуемый временной интервал при увеличении сейсмической активности увеличилось УЭС разломной зоны. Это можно объяснить тем, что при увеличении сейсмической активности происходит перераспределение флюида. Видимо, верхняя часть разреза становится менее флюидонасыщенной, вследствие чего повышается УЭС.

Благодарности

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ганеева Ж. Г. Определение понятия «Мониторинг» в различных сферах его применения // Вестник ЧелГУ. 2005. №1.
2. Заалишвили В. Б. и др. Мониторинг опасных геологических процессов в зоне предполагаемого Ардонского разлома и на участке трассы газопровода от сел. Дзуарикау до границы РСО-Алания //Геология и геофизика Юга России. – 2012. – Т. 2. – №. 4. – С. 25-32.
3. Яковлев В. Н., Шумакова Е. М., Трегуб Н. В. Сейсмическая активность и геодинамика Самарской области //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16. – №. 1-1.
4. Баталева Е. А., Баталев В. Ю. Магнитотеллурический мониторинг напряженно-деформированного состояния среды (для территории Центрального Тянь-Шаня) //Геолого-геофизическая среда, сейсмичность и сопутствующие процессы: Матер. конф. Нерюнгри: Изд-во: Технический ин-т (ф) СВТУ. – 2015. – С. 7-14.
5. Семинский К. Ж., Бобров А. А. Первые результаты исследований временных вариаций эманационной активности разломов Западного Прибайкалья //Геодинамика и тектонофизика. – 2013. – Т. 4. – №. 1.
6. Соболев Г. А. Основы прогноза землетрясений. – Общество с ограниченной ответственностью "Международная академическая издательская компания" Наука/Интерпериодика", 1993.
7. Lapenna V., Perrone A. Time-lapse electrical resistivity tomography (TL-ERT) for landslide monitoring: Recent advances and future directions //Applied Sciences. – 2022. – Т. 12. – №. 3. – С. 1425.
8. Барсуков О.М О связи электрического сопротивления горных пород с тектоническими процессами // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1970. – №1. – С. 84-89.
9. Зольников И.Д. Роль оледенений и гляциальных суперпаводков в геологическом строении осадочных комплексов верхней половины неоплейстоцена Горного Алтая и Приалтайской равнины. Дис. док. геол.-мин. наук. – Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010. – 416 с.
10. База данных “Землетрясения России” // ФИЦ ЕГС РАН [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eqru.gsras.ru/>
11. Шалагинов А. Е., Неведрова Н. Н. Электромагнитный мониторинг в афтершоковый период Чуйского землетрясения 2003 г. в Горном Алтае: методика измерений, результаты //Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14. – №. 4. – С. 0714.

© И. О. Шапаренко, Н. Н. Неведрова, 2024