

ВЫЯВЛЕНИЕ РАЗЛОМНЫХ СТРУКТУР И ИХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО ДАННЫМ МЕТОДА СОПРОТИВЛЕНИЙ В ЭПИЦЕНТРАЛЬНОЙ ЗОНЕ ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2003 г. (Горный Алтай)

Н.Н. Неведрова, Е.В. Деев, П.В. Пономарев

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

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

Рассмотрена методика комплексных измерений методами постоянного тока (вертикальное электрическое зондирование, электротомография), с помощью которой выявлены разломные нарушения и определены их геоэлектрические характеристики в западной части Чуйской впадины. По данным этих методов получены новые сведения о строении долины р. Чаган, находящейся в зоне разрушительных последствий Чуйского землетрясения 2003 г. По данным ВЭЗ построены глубинные геоэлектрические разрезы осадочной толщи и верхней части фундамента, выявлено блоковое строение. Разрезы электротомографии подтверждают крупное разломное нарушение между разновысотными блоками фундамента и указывают на наличие разломных зон, ограничивающих долину по ее правому борту и в юго-западной части.

Вертикальные электрические зондирования, электротомография, долина р. Чаган, геоэлектрические характеристики разломных зон.

FAULT STRUCTURES AND THEIR GEOELECTRIC PARAMETERS IN THE EPICENTRAL ZONE OF THE 27 SEPTEMBER 2003 CHUYA EARTHQUAKE (Gorny Altai) FROM RESISTIVITY DATA

N.N. Nevedrova, E.V. Deev, and P.V. Ponomarev

This paper presents an integrated measurement technique based on DC methods (vertical electrical sounding, electrical resistivity tomography) which was used to identify faults and determine their geoelectric parameters in the western part of the Chuya basin. New information on the structure of the Chagan River valley located in the zone of the disastrous 27 September 2003 Chuya earthquake has been obtained from the results of these methods. Geoelectric cross sections of the sedimentary sequence and the upper part of the basement were obtained from VES data, showing the block structure of the study area. Electrical resistivity tomography sections confirm the presence of a major fault between basement blocks of different heights and indicate the presence of faults bounding the valley on its right side and in the southwestern part.

Vertical electrical soundings, electrical resistivity tomography, Chagan River valley, geoelectric parameters of fault zones

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для изучения строения внутригорных впадин Горного Алтая широко используются активные электромагнитные методы постоянного и переменного тока [Неведрова и др., 2001, 2014; Оленченко и др., 2011; Деев и др., 2012а, б]. Наиболее крупная из подобных структур — Чуйская впадина — расположена в юго-восточной части Горного Алтая. Она выполнена комплексом континентальных отложений, которые представляют собой один из наиболее полных разрезов кайнозоя Внутренней Азии, а их мощность в северной и центральной частях впадины, по данным нестационарных электромагнитных зондирований, достигает 1000 м [Девяткин, 1981; Неведрова и др., 2001].

Повышенный интерес к строению юго-западной части Чуйской впадины возник после разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. с $M_w = 7.3$ и интенсивностью в эпицентре в 8—9 баллов, за которым последовал длительный афтершоковый процесс [Гольдин и др., 2004; Еманов и др., 2009; Лескова, Еманов, 2013]. Эпицентр главного толчка расположен в районе межвпадинной перемычки, отделяющей Чуйскую впадину от надстраивающей ее к западу Курайской.

Система первичных сейсморазрывов Чуйского землетрясения протяженностью более 70 км прослеживается вдоль северных склонов Южно- и Северо-Чуйского хребтов. В юго-западной части Чуйской впадины она зафиксирована от водораздела рек Ирбисту и Себыстей и далее на северо-запад, пересекая долины рек Ирбисту, Елангаш, Чаган, Талдура, Кускунур и водораздельные пространства между

ними. В плейстоценовой области землетрясения помимо первичных сейсморазрывов зафиксированы многочисленные вторичные сейсмодислокации в виде оползней, оплывин и обвалов скальных пород. Наиболее масштабный сейсмогенный оползень находится непосредственно на трассе выхода очага на поверхность, в правом борту р. Талдура. Как вторичные эффекты землетрясения, связанные с разжижением и флюидизацией тонкодисперсных влагонасыщенных грунтов, образовывались алевритопесчаные вулканы, грифоны, площадные разливы грязевого материала [Высоцкий и др., 2004; Деев и др., 2006; Рогожин и др., 2007; Lunina et al., 2008].

Характер поверхностных разрывов [Рогожин и др., 2007; Lunina et al., 2008] и анализ поля тектонических напряжений, по данным механизмов очагов афтершоков разных энергий [Лескова, Еманов, 2013], указывают на сложное блоковое строение очаговой области Чуйского землетрясения, а многочисленные первичные и вторичные сейсмодислокации — на множественность повторения здесь сильных древних землетрясений на протяжении четвертичного периода [Деев и др., 2006, 2009; Рогожин и др., 2008]. Поэтому поиск активных и потенциально сейсмогенерирующих разломов в фундаменте впадины, скрытых под мощной толщей кайнозойских отложений, является актуальной задачей.

В этой работе рассмотрено геоэлектрическое строение западной части Чуйской впадины — ящикообразного участка долины р. Чаган, который находится в эпицентральной зоне землетрясения с его многочисленными разрушительными проявлениями. В долине максимальная мощность осадков, по данным ранее проведенных геоэлектрических исследований, в основном не превышает 300 м [Неведрова и др., 2001]. Поэтому с учетом последних разработок для исследований долины выбран комплекс методов, включающий вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ) и электротомографию. Из малоуглубленных приповерхностных методов в последнее десятилетие многоэлектродные наблюдения (электротомография) развиваются наиболее активно. Эта технология объединяет принципы зондирования и профилирования, позволяет получить наиболее плотную сеть наблюдений и соответственно значительно увеличить детальность исследования приповерхностных отложений мощностью до десятков метров. В целом выбранные методы постоянного тока экономичны, мобильны, имеют развитые способы оперативной и углубленной обработки полевых данных и ряд модификаций, с помощью которых можно исследовать внутреннюю структуру земли от дневной поверхности до глубин в сотни метров.

По данным ВЭЗ построены глубинные геоэлектрические модели осадочной толщи, верхней части фундамента долины р. Чаган и выделены предполагаемые разломные структуры. Измерения методом электротомографии были выполнены позднее на локальных участках с целью получения более детальных характеристик выявленных разломных зон: положения и наклона сместителя, интервалов удельного сопротивления, характерных для этих структур. Фактически данные электротомографии подтверждают наличие разломов, верифицируя модели, полученные по данным ВЭЗ, а в ряде случаев позволяют эти разломы обнаружить. Результаты двух методов хорошо согласуются в диапазоне глубин электротомографии в пределах первой сотни метров, а комплексная интерпретация повышает общую информативность исследований.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДУЕМОГО УЧАСТКА ДОЛИНЫ Р. ЧАГАН

В левом борту долины Чагана расположен одноименный разрез, который является одним из ключевых объектов при изучении четвертичной истории Горного Алтая. Вопросам расчленения разреза на возрастные подразделения и фациальной диагностики отложений, особенно в его верхней части, посвящено достаточно большое количество публикаций. Основные точки зрения обобщены в работе [Русанов, Важов, 2014]. Авторы статьи в целом разделяют точку зрения Г.Г. Русанова, изложенную в указанной монографии. Согласно [Деев и др., 2012а, б; Русанов, Важов, 2014], разрез устроен следующим образом.

В разрезе четко обособляются две примерно равные по мощности толщи: 1) буроцветная, соответствующая основному этапу кайнозойского горообразования; 2) сероцветная полифациальная толща ледниковых и водно-ледниковых отложений, формирование которой связано с эпохами плейстоценовых оледенений Юго-Восточного Алтая. Наиболее древним стратонам, залегающим в основании буроцветной толщи и вскрывающимся в оползневых блоках у подножия обрыва, является туерыкская свита. Она представлена среднемиоцен-плиоценовыми светло-серыми и желтовато-серыми плотными карбонатными алевритистыми глинами и глинистыми алевритами, в которых довольно часто встречаются очень тонкие (первые мм) и крепкие лимонитизированные железистые слои темно-бурого, местами почти черного цвета, а также тонкие прослойки желтоватых разнозернистых песков. Видимая мощность свиты более 15 м.

Вверх по разрезу туерыкская свита постепенно фациально замещается нижнечетвертичными озерно-аллювиальными отложениями прибрежно-дельтовых фаций бекенской свиты желто-бурого цвета. В составе свиты наблюдается переслаивание плотных желто-бурых грубозернистых гравийных пе-

сков, глинистых алевритов, средне- и хорошо окатанных гравия и мелкого галечника. Мощность свиты не менее 30 м.

На бекенской свите с размывом лежит толща аллювиальных и аллювиально-пролювиальных буровато-желтоватых валунных галечников с глинистым разнозернистым песком в заполнителе башкауской свиты раннечетвертичного возраста мощностью около 80 м. Среди галечников присутствуют не протяженные и маломощные линзы глинистых песков, алевритов, гравийников. Как и во всем буруцетном комплексе, слоистость очень полого, под углом 3—5° падает на восток.

Кровля башкауской свиты сильно размыта, а в ее толще четко виден глубокий долинообразный эрозионный врез. Во врезе на башкауской свите с угловым несогласием, свидетельствующим о длительном размыве и перерыве в осадконакоплении, лежит желтовато-серая толща мелковалунно-суглинистой основной морены мощностью не менее 5 м. Вверх по разрезу она постепенно замещается флювиогляциальной толщей серых галечников с протяженными линзами мощностью 0.2—0.5 м хорошо промытых косослоистых среднезернистых песков и гравийников.

Вверх по разрезу происходит постепенное фациальное замещение флювиогляциальной толщи озерно-ледниковыми образованиями, которые залегают в виде мощной (46—50 м) линзы, выполняющей верхнюю часть эрозионного вреза. Эта линза сложена белесыми алевритами и пелитами.

Кровля озерно-ледниковой линзы, выполняющей эрозионный долинообразный врез в галечниках башкауской свиты, и кровля самой этой свиты срезаются, и с азимутальным несогласием перекрываются толщей серых ледниковых и флювиогляциальных существенно валунно-галечных отложений мощностью до 100 м.

Строение пониженной части долины р. Чаган изучено недостаточно. По данным гидрогеологических скважин, материалов геологической съемки [Пономарев и др., 2009] и авторских наблюдений, здесь в приповерхностной части разрез сложен позднеплейстоценовыми флювиогляциальными галечниками и валунно-галечниками, тонкозернистыми озерно-ледниковыми отложениями. В них вложены голоценовый аллювий, представленный русловыми галечниками и пойменными алевритами, песками и суглинками.

Проведенное нами параметрическое геоэлектрическое зондирование методом ВЭЗ в пределах Чаганского разреза показало следующее [Деев и др., 2012а, б]. В целом толща моренных диамиктонов и флювиогляциальных валунно-галечников характеризуется значением УЭС в 5000 Ом · м. Подстилающие их ледниково-озерные отложения являются низкоомными и имеют УЭС 110 Ом · м. Зондирование, проведенное на поверхности одной из гряд, расположенных вдоль разреза, позволило получить УЭС существенно песчаных отложений бекенской свиты в 460 Ом · м. Подстилающий проводящий горизонт с УЭС, равным 55 Ом · м, не имеет выхода на дневную поверхность, но по результатам наших геоэлектрических наблюдений в Чуйской и Курайской впадинах [Деев и др., 2012а, б; Неведрова и др., 2014] может быть сопоставлен с озерными отложениями существенно глинистого и алевритового состава.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Метод ВЭЗ. В долине р. Чаган имеется система наблюдений методом ВЭЗ, созданная в 2004—2012 гг. после Чуйского события 2003 г. Измерения ВЭЗ выполнены по трем профилям, практически параллельным течению реки (рис. 1). Пункты ВЭЗ размещены в пределах уплощенного днища долины, минуя заболоченные участки. С юго-запада профили ограничены положением поперечного к долине ригеля, сложенного осадочными породами позднекембрийско-раннеордовикской сайлюгемской свиты [Пономарев и др., 2009]. Короткий профиль 1 пересекает зону сейсморазрывов Чуйского землетрясения; расстояния между пунктами по профилю составляют в среднем 200 м. Протяженные профили 2 и 3 пересекают весь участок с юго-запада на северо-восток с шагом по профилю в основном в 500 м. Профиль 2 выполнен от крестового ВЭЗ 17-18 до ВЭЗ 33 на левом берегу р. Чаган. Четыре следующих пункта (34, 19-20, 35 и 25) надстраивают профиль 2 на правобережье реки. Общая длина профиля около 6 км. Профиль 3 (ВЭЗ 12—ВЭЗ 5) длиной ~ 4 км протянулся вдоль правого берега р. Чаган.

В ходе полевых работ использовалась стандартная низкочастотная электроразведочная аппаратура АНЧ-3 и комплект аппаратуры SARIS. Все измерения осуществлялись с четырехэлектродной установкой Шлюмберже с размерами полуразноса генераторной линии (AB/2) в интервале от 1.5 до 1000 м. В районе наблюдается низкий уровень помех и по результатам повторных ВЭЗ относительная погрешность измерений составляет менее 5 %. Результаты математического моделирования показали, что выбранные размеры установок позволяют получить необходимую глубинность на участке исследования. Но сложный рельеф дневной поверхности не всегда дает возможность выполнить измерения с максимальным разносом. Тем не менее большая часть кривых ВЭЗ имеет правую восходящую ветвь, что свидетельствует о возможности определения глубины до опорного горизонта (фундамента впадины) и его удельного сопротивления.

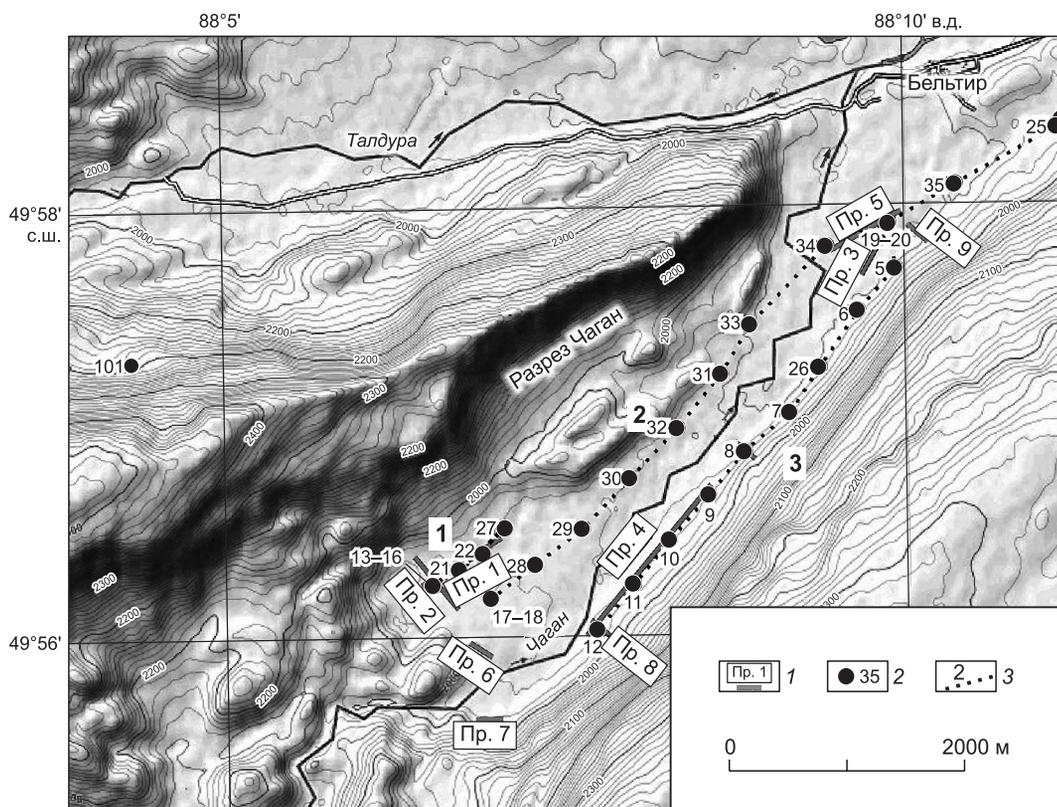


Рис. 1. Схема наблюдений методами постоянного тока в долине р. Чаган. Западная часть Чуйской впадины.

1 — профили электротомографии, 2 — пункты ВЭЗ, 3 — профили ВЭЗ.

На рис. 2 показаны типичные полевые кривые ВЭЗ 33, 34, полученные в 2010 г. Геоэлектрические модели по данным этих ВЭЗ получены в результате инверсии полевых данных с использованием программного комплекса «СОНЕТ» в рамках горизонтально-слоистой модели [Эпов и др., 1990]. Для характеристики достигнутой глубинности метода на разных участках долины выполнено сопоставление геоэлектрических моделей ВЭЗ 33, 34 (таблица).

По данным ВЭЗ 33 получен полный разрез осадочного чехла и глубина до фундамента в 310 м. По данным ВЭЗ 34 определены только параметры верхней части разреза, так как высокоомный горизонт с $УЭС = 15\ 000\ \text{Ом} \cdot \text{м}$ ограничивает глубину исследования, а особенности рельефа не позволили увеличить полуразнос генераторной линии более 500 м. Среднеквадратичная погрешность подбора составляет $\sim 8\%$, что является неплохим результатом с учетом сложного строения этого участка впадины. Уже предварительная обработка полевого материала позволила выявить некоторые важные особенности строения района. На ряде кривых ВЭЗ наблюдается максимум, амплитуда которого свидетельствует о присутствии в разрезе горизонта с аномально высокими значениями удельного электрического сопротивления, достигающими, по данным некоторых ВЭЗ, $15\ 000\text{—}20\ 000\ \text{Ом} \cdot \text{м}$. С учетом априорной информации отложения с такими значениями $УЭС$ можно отнести к многолетнемерзлым.

Геоэлектрические модели ВЭЗ 33 и 34

ВЭЗ 33			ВЭЗ 34		
№ слоя	УЭС, Ом · м	Мощность, м	№ слоя	УЭС, Ом · м	Мощность, м
1	360	1	1	30	0.8
2	2700	3	2	270	3
3	230	30	3	15000	25
4	850	45	4	30	—
5	35	230	—	—	—
6	2000	—	—	—	—

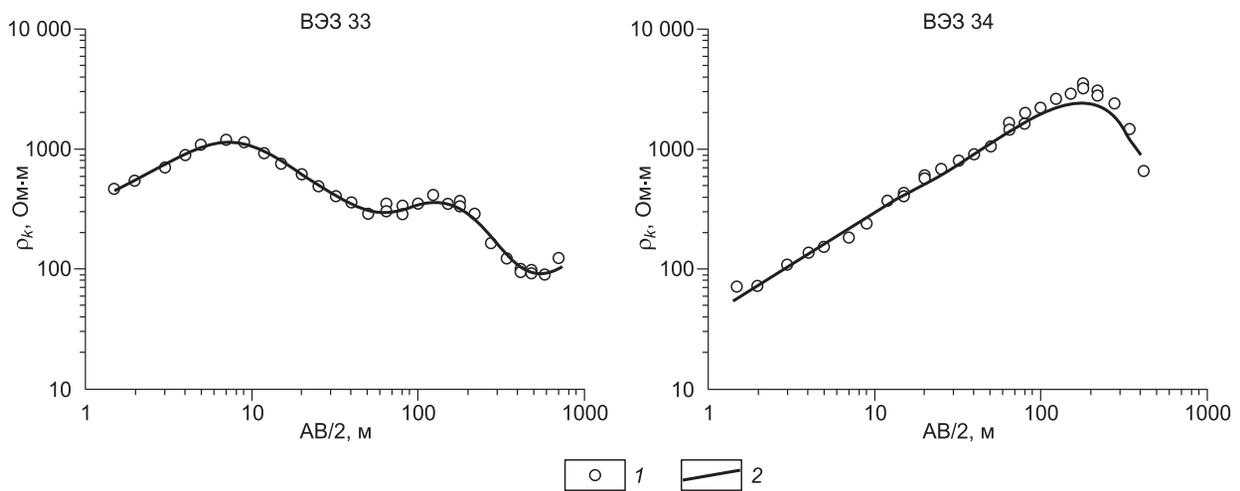


Рис. 2. Характерные полевые кривые ВЭЗ 33, 34 в долине р. Чаган.

1 — полевые данные ВЭЗ, 2 — теоретическая кривая ВЭЗ.

Весь объем полевых данных ВЭЗ проинтерпретирован с использованием программных комплексов моделирования и инверсии Zond (<http://zond-geo.ru>), «СОНЕТ» в рамках горизонтально-слоистой модели среды. Для первичной обработки применен программный пакет PI2Win, в котором возможна визуализация полевых данных ВЭЗ по профилю. Завершающая визуализация данных выполнена с использованием пакета программ Zond и пакетов CorelDraw, Surfer.

Электротомография. Профили электротомографии выполнены в течение полевых сезонов 2012–2014 гг. с использованием универсальной станции «Скала-48М» российского производства. К станции подключаются два 24-электродных кабеля с шагом между электродами 5 м, что позволяет получить геоэлектрический разрез по профилю протяженностью 235 м. Более протяженные непрерывные профили выполнены путем переноса первого сегмента многоэлектродного кабеля предыдущей расстановки далее по профилю. С использованием четырехэлектродной установки Шлюмберже глубинность измерений составила около 50–60 м. С целью увеличения глубины исследования до 100–120 м были реализованы измерения с трехэлектродной установкой $AMN\infty$, с выносным питающим электродом [<http://nemfis.ru>, <http://электроразведка.рф>].

Интерпретация данных электротомографии выполнена с использованием программы ZondRes2d [<http://zond-geo.ru>]. С помощью нескольких процедур автоматизированной инверсии этой программы данные можно оперативно обрабатывать в поле. В результате полученные геоэлектрические разрезы наглядно отражают двумерное распределение удельного сопротивления, по которому можно оценить размеры неоднородностей при наличии блокового строения верхней части, ширину разломной зоны и в случае необходимости — можно продлить либо сдвинуть профиль. В ходе дальнейшей обработки можно выбрать различные способы инверсии и визуализации данных для построения окончательных разрезов, и далее использовать результаты электротомографии при построении начальной модели двух-трехмерного численного моделирования.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вначале рассмотрим геоэлектрическое строение участка по протяженным профилям ВЭЗ 2 и 3 (рис. 3). Стартовая интерпретационная модель была построена с учетом априорных данных и геоэлектрические характеристики разреза обоснованы по данным скважин, результатам параметрических измерений ВЭЗ [Деев и др., 2012а]. В целом она хорошо сопоставляется с геоэлектрическими моделями, полученными нами ранее для Чуйской и Курайской впадин [Неведрова и др., 2001, 2014; Деев и др., 2012а].

Два самых верхних высокоомных горизонта маломощны, поэтому на геоэлектрических разрезах не отражены. Разброс УЭС этих отложений отражает гранулометрические различия голоценового руслового и пойменного аллювия р. Чаган, представленного галечниками и алевропесками соответственно.

Ниже по разрезу наблюдается слой, который слагают породы с высокими значениями электросопротивления. Он может быть сопоставлен с толщиной аллювиальных и флювиогляциальных валунно-галечников. Участки разреза с максимальными значениями УЭС, скорее всего, соответствуют зонам развития многолетней мерзлоты. Выделяемый ниже слой с УЭС в диапазоне 300–2000 Ом·м, согласно

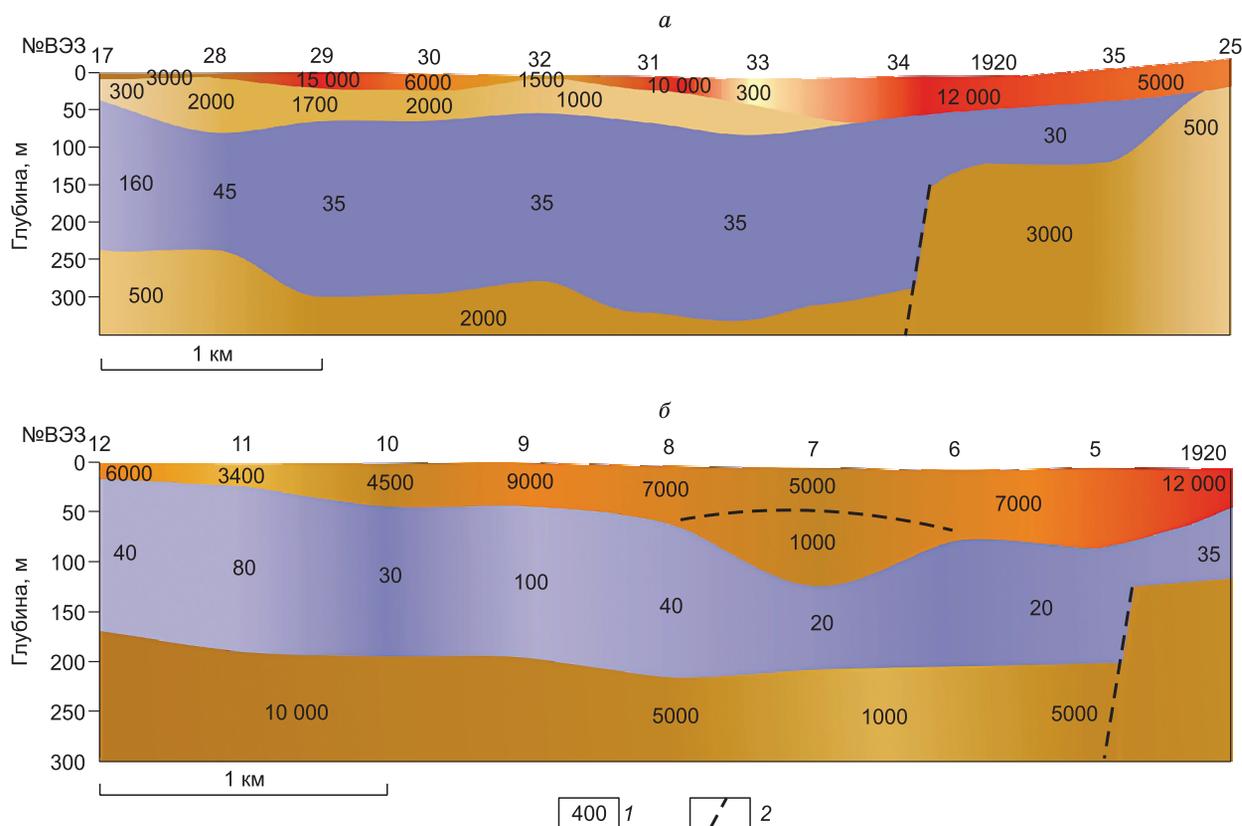


Рис. 3. Геоэлектрические разрезы:

а — по профилю 2, *б* — по профилю 3 в долине р. Чаган. Цифры — удельное сопротивление, Ом · м; штриховая линия — предполагаемый разлом.

общей геологической ситуации, предварительно может быть соотнесен с грубообломочными нижнечетвертичными отложениями башкауской свиты и подстилающими ее существенно песчаными образованиями бекенской свиты. Еще глубже выделен наиболее однородный мощный низкоомный слой. Его УЭС составляет в среднем от 40 до 60 Ом · м (в краевых частях долины значения могут возрастать до 100 Ом · м и более), а мощность варьирует от 120 до 150 м. По значениям УЭС можно предположить, что он соотносится с неогеновыми озерными отложениями глинисто-песчаного состава. Подстилает осадочные горизонты относительно неглубоко залегающий в этом месте палеозойский фундамент (~ 300 м). На обоих разрезах по изменению абсолютных отметок кровли фундамента и резкому изменению мощности низкоомного геоэлектрического слоя зафиксировано предполагаемое разломное нарушение. Геоэлектрические разрезы отражают блоковое строение участка.

Построенная по данным ВЭЗ карта глубин до опорного горизонта (фундамента) наглядно показывает наличие приподнятого блока на северо-востоке с сокращенной до 120 м мощностью кайнозойских отложений относительно юго-западного блока, в пределах которого глубины до высокоомного основания достигают 300 м (рис. 4). По данным ВЭЗ, выполненных с шагом в среднем 500 м между пунктами, невозможно определить геоэлектрические характеристики разломной зоны, таких как положение сместителя и его возможный наклон, а также другие параметры (ширину, удельное сопротивление). Для уточнения этих параметров и выяснения возможного проявления разлома в верхней части разреза, а также для получения приповерхностных геоэлектрических характеристик были проведены измерения по профилю 5 электротомографии.

Профиль 5 электротомографии длиной в 800 м выполнен между пунктами ВЭЗ 34 и 19-20 с трехэлектродной установкой, и по результатам интерпретации двумерный разрез построен до глубин более 100 м. На разрезе, практически в его середине, хорошо выделяется субвертикальная зона с пониженным сопротивлением горных пород, разделяющая два более высокоомных блока. Ширина зоны примерно 130 м (рис. 5).

Таким образом, данные электротомографии указывают на возможность продолжения выявленной на разрезах по данным ВЭЗ разломной зоны и в четвертичные отложения. Понижение сопротивлений

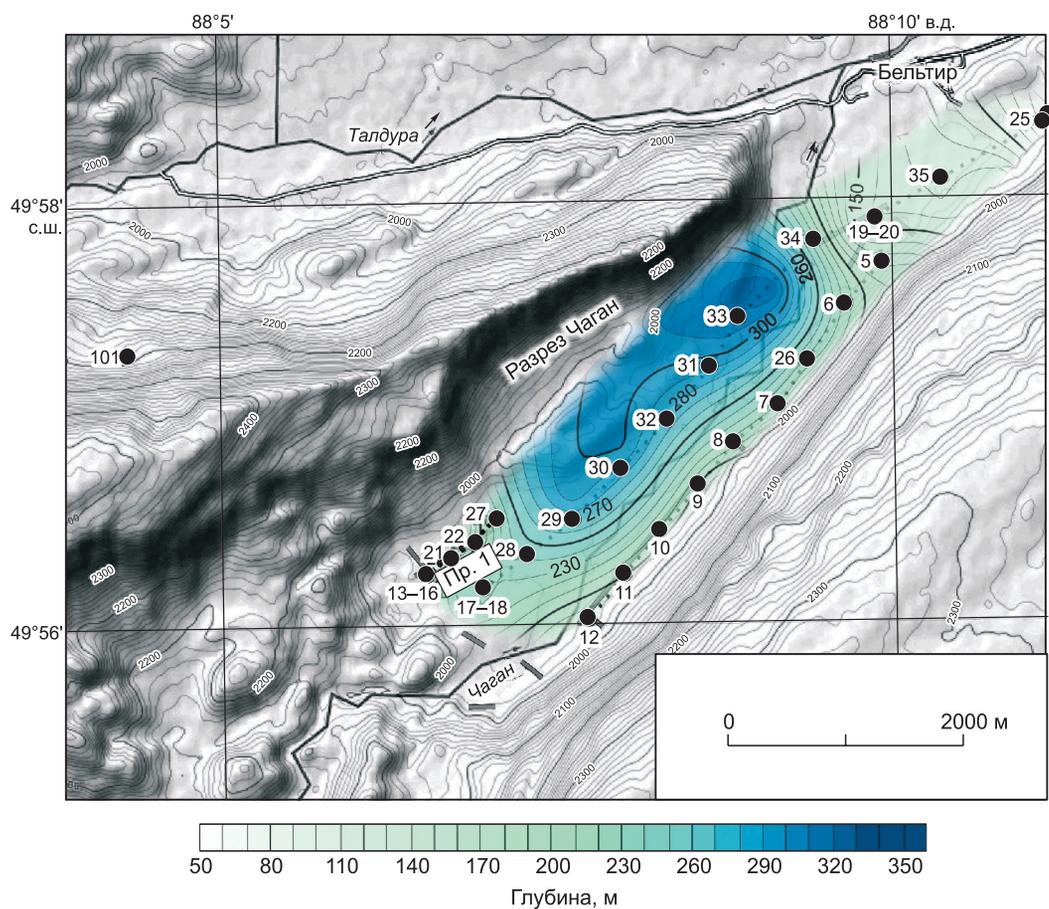


Рис. 4. Рельеф поверхности фундамента по данным ВЭЗ. Долина р. Чаган.

Усл. обозн. см. на рис. 1.

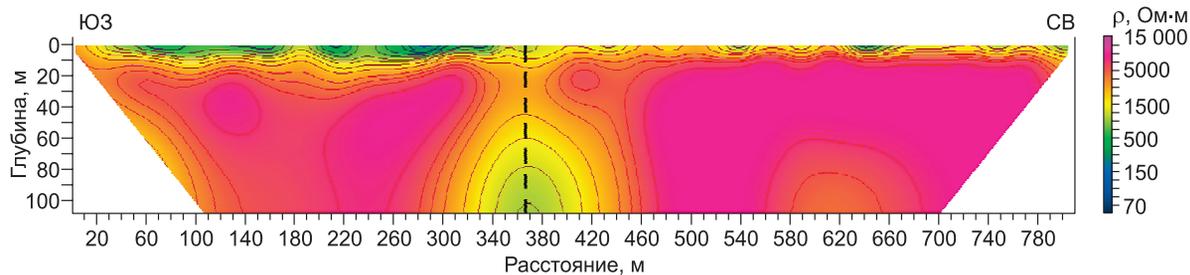


Рис. 5. Разрез по данным электротомографии по профилю 5. Северо-восточная часть долины р. Чаган.

Штриховая линия — предполагаемый разлом.

может быть следствием повышенной трещиноватости отложений в зоне влияния разломной зоны и ее обводненности. Это подтверждается и тем, что в результате Чуйского землетрясения 2003 г. на простирации выявленной разломной зоны сформировались многочисленные бугры пучения (рис. 6).

Крайне интересны электротомографические разрезы по профилям 9 и 8 (рис. 7). Профиль 9 протяженностью 235 м выполнен с использованием четырехэлектродной установки от пункта ВЭЗ 19-20 в сторону правого борта долины. Полученный геоэлектрический разрез показал, что профиль пересекает проводящую субвертикальную зону, которую можно интерпретировать как разлом (см. рис. 7, а). Эта зона разделяет высокоомный блок юго-восточной части разреза (борт долины) от более проводящих отложений на северо-западе в районе пункта ВЭЗ 19-20.

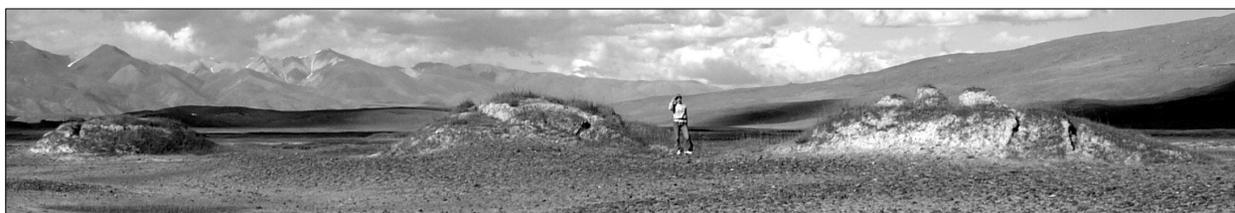


Рис. 6. Линейно расположенные бугры пучения на пойме р. Чаган в зоне предполагаемого разлома, возникшие после Чуйского землетрясения 2003 г.

Аналогичная ситуация наблюдается и на разрезе по профилю 8, который протянут от пункта ВЭЗ 12 также в сторону правого борта долины (см. рис. 7, б). Наклонная разломная зона фиксируется в средней части разреза по профилю 8, выделяясь более проводящей вставкой относительно вмещающих пород. Таким образом, электротомографические исследования по профилям 9 и 8 позволяют предположить, что правый борт долины р. Чаган имеет разломное ограничение.

Профили 1, 2, 6, 7 электротомографии выполнены в юго-западной части долины р. Чаган. Здесь днище долины вблизи ригеля, сложенного коренными породами и имеющего разломное ограничение, пересекла трасса основных сейсмогенных разрывов Чуйского землетрясения 2003 г. Первичные сейсмодислокации представлены здесь тремя эшелонированно надстраивающими друг друга сейсморвами шириной до 6 м и протяженностью до 150 м [Рогожин и др., 2007]. В парагенезе с трещинами растяжения проявились грифоны и вулканы (рис. 8), из которых происходило излияние алеврито-песчаных и грязевых масс как результат развития процесса флюидизации приповерхностной части осадочного разреза [Деев и др., 2006; Рогожин и др., 2007]. Раскопки грифонов позволили зафиксировать подводящие каналы грифонов в виде даек на глубину в первые метры [Lunina, Gladkov, 2015].

Профиль 1 направлен вкрест простирания сейсмогенных разрывов, а профиль 2 вдоль простирания сейсмодислокаций. На разрезе по профилю 1 наблюдаются субвертикальные и наклонные зоны пониженных сопротивлений разной протяженности на глубину, соответствующие разрывам на поверхности (рис. 9, а). Эти зоны рассекают высокоомный слой с УЭС до 15000 Ом·м, который по значениям сопротивлений, очевидно, соответствует многолетнемерзлым породам. Зоны разрывов в многолетнемерзлых породах могли служить каналами миграции подмерзлотных вод, которые, наряду с надмерз-

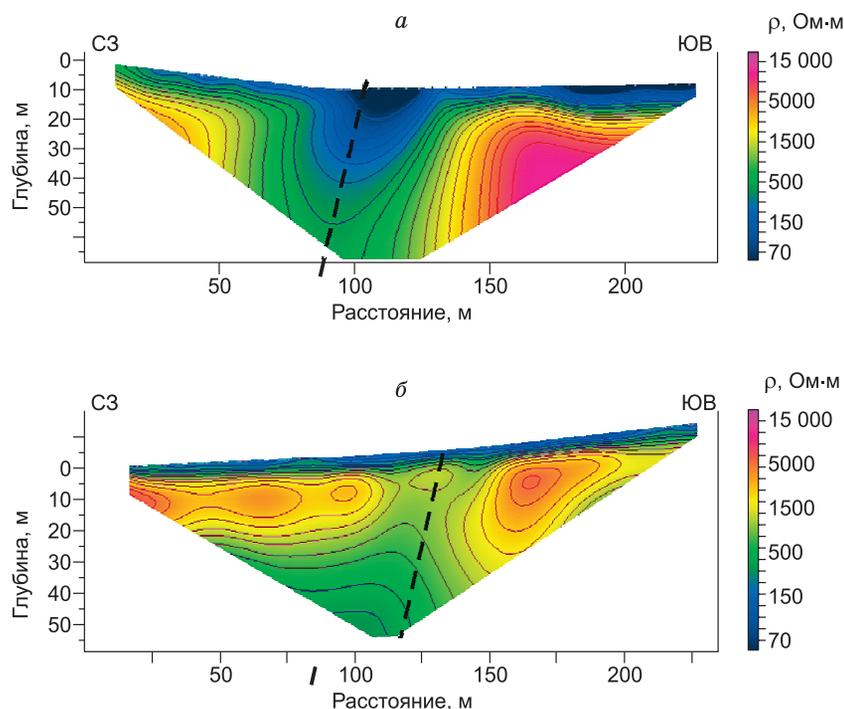


Рис. 7. Геоэлектрические разрезы по данным электротомографии.

а — по профилю 9, б — по профилю 8. Правый борт долины р. Чаган. Усл. обозн. см. на рис. 5.



Рис. 8. Первичные и вторичные сейсмогенные деформации Чуйского землетрясения 2003 г. в долине р. Чаган.

а — один из сейсморов; черными стрелками показано положение грифонов; белая стрелка — древний сейсморов на коренном ригеле. *б* — один из грифонов, из которого происходило излияние грязеводной массы. *в* — вулкан, сложенный алевритопесчаным материалом.

лотными водами участвовали в излиянии на дневную поверхность разжиженного материала при формировании вторичных сейсмодислокаций Чуйского землетрясения. На разрезе по профилю 2 видно, что многолетнемерзлые высокоомные породы не имеют сплошного распространения, так как в его юго-восточной части выделяется протяженная зона с пониженными значениями сопротивления (см. рис. 9, б).

Наконец, самые южные профили 6 и 7 выполнены на разных берегах р. Чаган, в месте «запирания» плоского дна долины ригелем, сложенным коренными породами. На разрезе по профилю 6 на глубинах более 10 м выделяются два блока: северо-западный высокоомный, соответствующий коренным породам, и юго-восточный, характеризующий осадочные отложения долины. Таким образом, разрез отражает разломное (сбросовое) ограничение ригеля (рис. 10, а). Профиль 7 выполнен в правобережье реки, параллельно простиранию ригеля. В геоэлектрическом разрезе профиля 7, начиная с самой верхней части, прослеживаются несколько субвертикальных низкоомных зон, которые можно интерпретировать как разломы или зоны повышенной трещиноватости (см. рис. 10, б).

Вместе с тем эти зоны могут быть сопоставлены как с разломами, субпараллельными сбросовому ограничению ригеля, так и с нарушениями, надстраивающими разломную зону правого борта долины, зафиксированную на разрезах по профилям электротомографии 8 и 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным ВЭЗ построены глубинные разрезы, которые дают представление о геоэлектрическом строении осадочной толщи и верхней части фундамента эпицентральной зоны Чуйского землетрясения 2003 г. в долине р. Чаган. В пределах плоского дна долины выявлены два блока фундамента с глубинами залегания 120 и 300 м, которые разделены разломом северо-западной ориентировки. Карта глубин залегания кровли палеозойского фундамента показывает общее увеличение мощностей кайнозойских отложений в сторону левого борта долины. В самом разрезе кайнозоя наибольшую роль играют низкоомные отложения, которые могут быть соотнесены с неогеновыми озерными отложениями глинисто-песчаного состава. Выше залегают полифациальные высокоомные четвертичные отложения, в верхней части которых широко распространены многолетнемерзлые породы.

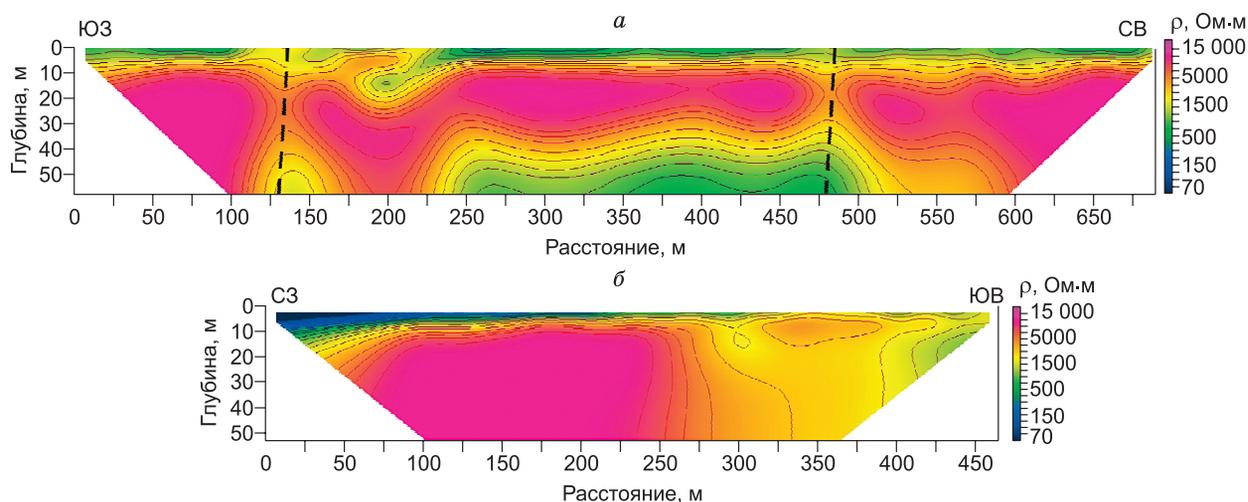


Рис. 9. Разрезы по данным электротомографии в зоне сейсмодислокации.

a — по профилю 1, *б* — по профилю 2. Юго-западная часть долины р. Чаган. Усл. обозн. см. на рис. 5.

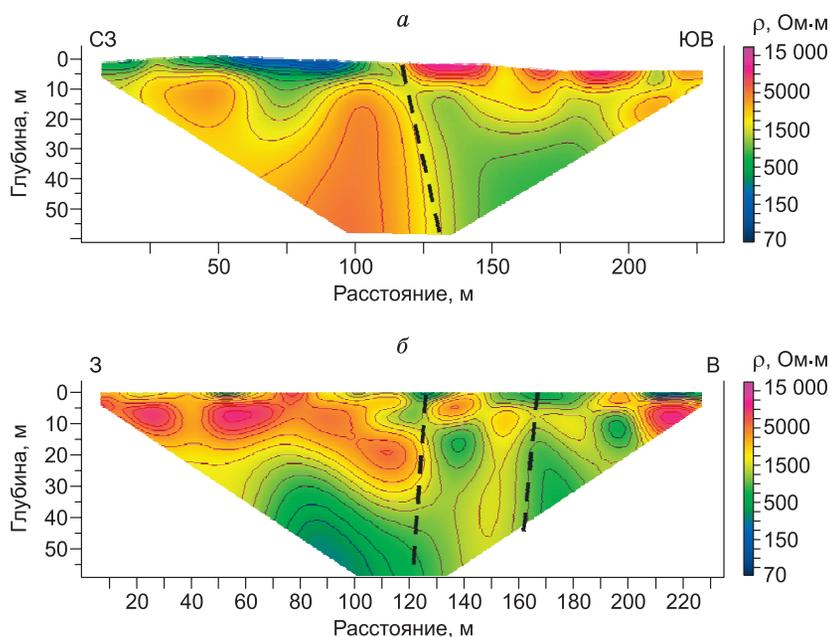


Рис. 10. Разрезы по данным электротомографии.

a — по профилю 6, *б* — по профилю 7. Южная часть долины р. Чаган. Усл. обозн. см. на рис. 5.

Исследования методом электротомографии, помимо подтверждения разломного нарушения между разновысотными блоками фундамента, указывают на наличие разлома вдоль правого борта долины Чагана, на разломные ограничения коренного ригеля, расположенного на юго-западе участка, на наличие разломов и зон трещиноватости, хорошо коррелируемых с поверхностными разрывами Чуйского землетрясения, которые служили каналами миграции к поверхности флюидизированных масс.

Таким образом, в статье предложена методика измерений и интерпретации данных методов сопротивлений, позволяющая выявлять разломные нарушения и определять их геоэлектрические характеристики. По комплексным данным этих методов получены новые сведения о строении долины р. Чаган после разрушительного землетрясения, существенно изменившего ее облик. В дальнейшем будут продолжены полевые работы по уточнению строения разломных зон Чуйской впадины, а уже полученные полевые данные, результаты их интерпретации, такие как ширина, интервалы значений удельного сопротивления, наклоны сместителя разломных зон будут использованы для численного трехмерного моделирования и построения 3D модели этого сложнопостроенного участка эпицентральной зоны — долины р. Чаган.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 15-35-20614 мол_а_вед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Высоцкий Е.М., Новиков И.С., Агатова А.Р., Деев Е.В., Скобелицин Г.А., Макарова Д.Д.** Строение зоны поверхностных деформаций Чуйского землетрясения 2003 года (Горный Алтай) // Рельефообразующие процессы: теория, практика, методы исследования. Материалы XXVIII Пленума Геоморфологической комиссии РАН. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2004, с. 65—67.
- Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Еманов А.А., Новиков И.С., Высоцкий Е.М., Фатеев А.В., Колесников Ю.И., Подкорытова В.Г., Лескова Е.В., Ярыгина М.А.** Чуйское землетрясение и его афтершоки // ДАН, 2004, т. 395, № 4, с. 1—4.
- Девяткин Е.В.** Кайнозой Внутренней Азии (стратиграфия, геохронология, корреляция). М., Наука, 1981, 196 с.
- Деев Е.В., Гибер А.С., Чигвинцева Л.А., Буряк Е.А., Рябинин А.Б.** Сейсмодислокации Чуйского землетрясения 2003 года и их палеоаналоги в кайнозойской структуре Горного Алтая // Области активного тектоногенеза в современной и древней истории Земли: материалы XXXIX тектонического совещания. М., ГЕОС, 2006, т. 1, с. 207—210.
- Деев Е.В., Зольников И.Д., Гуськов С.А.** Сейсмиды в четвертичных отложениях Юго-Востока Алтая // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (6), с. 703—722.
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Зольников И.Д., Русанов Г.Г., Пономарев П.В.** Геоэлектрические исследования отложений Чуйской котловины (Горный Алтай) // Геология и геофизика, 2012а, т. 53 (1), с. 120—139.
- Деев Е.В., Неведрова Н.Н., Русанов Г.Г., Санчаа А.М., Бабушкин С.М., Кречетов Д.В., Ельцов И.Н., Зольников И.Д.** Новые данные о строении Уймонской межгорной впадины (Горный Алтай) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири, 2012б, № 1 (9), с. 15—23.
- Еманов А.А., Лескова Е.В., Еманов А.Ф., Фатеев А.В.** Элементы структуры и фазы развития афтершокового процесса Чуйского землетрясения // Физическая мезомеханика, 2009, т. 12, № 1, с. 29—36.
- Лескова Е.В., Еманов А.А.** Иерархические свойства поля тектонических напряжений в очаговой области Чуйского землетрясения 2003 года // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (1), с. 113—123.
- 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.
- Неведрова Н.Н., Деев Е.В., Санчаа А.М.** Глубинное строение и характеристики краевых структур Курайской впадины (Горный Алтай) по данным геоэлектрики с контролируемым источником // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (1), с. 119—132.
- Оленченко В.В., Кожевников Н.О., Антонов Е.Ю., Потапов В.В., Шенин А.Н., Стефаненко С.М.** Распространение толщи мерзлых пород в Чуйской впадине (Горный Алтай) по данным электромагнитных зондирований // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 1, с. 15—22.
- Пономарев А.Л., Крупчатников В.И., Русанов Г.Г., Кривчиков В.А., Попова О.М., Карабицина Л.П.** Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:200 000. Издание второе. Серия Горно-Алтайская, листы М-45-XXIII, М-45-XXIX Объяснительная записка. СПб., Изд-во СПб картфабрики ВСЕГЕИ, 2009, 298 с.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В., Ушанова Е.А.** Тектоническая позиция и геологические проявления Алтайского землетрясения // Геотектоника, 2007, № 2, с. 3—22.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Мараханов А.В.** Сильнейшие землетрясения на юге Горного Алтая в голоцене // Физика Земли, 2008, № 6, с. 31—51.
- Русанов Г.Г., Важов С.В.** Опорные разрезы четвертичных отложений Горного Алтая (Беле, Кубадру, Чаган). Бийск, ФГБОУ ВПО «АГАО», 2014, 163 с.
- Эпов М.И., Дашевский Ю.А., Ельцов И.Н.** Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск, 1990, 29 с. (Препринт ИГиГ СО АН СССР; № 3).
- Lunina O.V., Gladkov A.S.** Seismically induced clastic dikes as a potential approach for the estimation of the lower-bound magnitude/intensity of paleoearthquakes // Engin. Geol., 2015, v. 195, p. 206—213.
- Lunina O.V., Gladkov A.V., Novikov I.S., Agatova A.R., Vysotskii E.M., Emanov A.A.** Geometry of the fault zone of the 2003 $M_s = 7.5$ Chuya earthquake and associated stress fields, Gorny Altai // Tectonophysics, 2008, v. 453, p. 276—294.
- <http://zond-geo.ru>
<http://nemfis.ru>
<http://электроразведка.рф>