

УДК 551.243+550.837

DOI 10.21285/0130-108X-2016-57-4-30-42

НАРУШЕННОСТЬ СКАЛЬНОГО МАССИВА И ПОЛЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В БЛИЗПОВЕРХНОСТНОЙ ЧАСТИ ЗЕМНОЙ КОРЫ ТЕКТОНИЧЕСКИ АКТИВНЫХ РЕГИОНОВ (НА ПРИМЕРЕ ЗАПАДНОГО ПРИБАЙКАЛЬЯ)

© К.Ж. Семинский¹, Р.М. Зарипов²^{1,2}Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

В статье на примере Приольхонья (Западное Прибайкалье) представлены результаты исследования методом малоуглубинной электротомографии специфики нарушенности скальных массивов, обусловленной процессами разрывообразования и выветривания. Кроме электроразведки методический комплекс включал структурно-геологические приемы изучения разломов и степени трещиноватости породного массива, а также вспомогательные способы оценки его проницаемости для газов (эманационная съемка) и воды (способ наливов в шурфы), реализованные в профильном варианте. Комплексные исследования проведены на 15 участках, в пределах 10 из которых обнажаются разломные зоны, нарушающие разнотипные породы Приольхонья (биотитовые гнейсы, гранито-гнейсы, марморы и др.). Анализ десятков геоэлектрических и геолого-структурных разрезов, а также соответствующих им графиков вариаций плотности трещин, концентрации почвенного радона и других параметров позволил установить, что поле удельного электрического сопротивления ρ адекватно отражает нарушенность скального массива в верхней части земной коры Западного Прибайкалья. Для пород Приольхонья установлена обратная зависимость параметра ρ от величины D – плотности трещин в одном погонном метре. Показано, что ее характер является информативной оценкой степени нарушенности скального массива. При небольших значениях плотности трещин ($D < 15$ тр./пог.м – в Приольхонье) электропроводность массива зависит от реологических свойств горных пород. Вблизи разломов (где $D > 15$ тр./пог.м), величина ρ определяется степенью нарушенности скального массива и практически не зависит от типа породы. В Приольхонье уровень $\rho = 1000$ Ом·м может быть использован в качестве первого приближения для выделения на геоэлектрическом разрезе границы наиболее нарушенной части разломной зоны. Установленные закономерности открывают перспективы применения электротомографии в целях картирования разрывной структуры и внутреннего строения разломов в тектонически активных регионах.

Ключевые слова: малоуглубинная электротомография, скальный массив, разломная зона, плотность трещиноватости, удельное электрическое сопротивление.

Формат цитирования: Семинский К.Ж., Зарипов Р.М. Нарушенность скального массива и поле удельного электрического сопротивления в близповерхностной части земной коры тектонически активных регионов (на примере Западного Прибайкалья) // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2016. № 4 (57). С. 30–42. DOI 10.21285/0130-108X-2016-57-4-30-42.

ROCK MASSIF FRACTURING AND THE FIELD OF SPECIFIC ELECTRICAL RESISTIVITY IN THE NEAR-SURFACE EARTH CRUST IN TECTONIC ACTIVE REGIONS (ON EXAMPLE OF WEST PRIBAIKALIE)

K.Zh. Seminskiy, R.M. Zaripov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, 128, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

On example of Priolkhonie (the Western Baikal region) the article introduces the results of electrical resistivity tomography-based study of the fracturing features of rocks caused by faulting and weathering. In addition to the electrical resistivity tomography, the research employs the structural and geological methods to study the faults and massif fracturing ratio, also radon surveys and filling holes with water are used as support technologies for the

¹Семинский Константин Жанович, заместитель директора по научной работе, тел.: (3952) 423027, e-mail: seminsky@crust.irk.ru

Seminskiy Konstantin, Deputy Director for Research, tel.: (3952) 423027, e-mail: seminsky@crust.irk.ru

²Зарипов Руслан Минерафитович, инженер, тел.: (3952) 423027, e-mail: rassell88@yandex.ru

Zaripov Ruslan, Engineer, tel.: (3952) 423027, e-mail: rassell88@yandex.ru

assessment of rock permeability. Comprehensive studies covered 15 sites, including 10 sites with outcropped fault zones disturbing different type rocks of Priolkhonie (biotite gneiss, granite gneiss, marble, etc). The authors have analyzed dozens of geoelectrical and geological-structural profiles and corresponding graphs of fracture density variations, soil radon concentration values and other parameters, and revealed that the field of specific electric resistivity ρ provides an adequate reflection of massif fracturing in the upper crust in West Pribaikalie. Inverse dependence of parameter ρ on the value D – the density of fractures on 1 running meter is found for the rocks of Priolkhonie. It is shown that its nature is an informative assessment of the fracturing degree of a rock massif. At small values of fracture density ($D < 15$ fract./run.m – in Priolkhonie) electric conductivity of the massif depends on the rheological properties of rocks. Near the faults (where $D > 15$ fract./run.m), the value ρ is determined by the fracturing degree of the rock massif and practically does not depend on the rock type. In Priolkhonie the level ρ of 1000 Ohm.m can be used as the first approximation for distinguishing the border of the most broken part of the fault zone on a geoelectric cross section. Determined regularities open the prospects for electrical resistivity tomography application in mapping of faults and internal structure of fault zones in tectonic active regions.

Keywords: electrical resistivity tomography at shallow depths, rock massif, fault zone, density of fractures, specific electrical resistivity

For citation: Seminskiy K.Zh., Zaripov R.M. Rock massif fracturing and the field of specific electrical resistivity in the near-surface Earth crust in tectonic active regions (on example of West Pribaikalie). Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits. 2016. No. 4 (57). Pp. 30–42. DOI 10.21285/0130-108X-2016-57-4-30-42.

Введение

Оценка состояния скальных пород у земной поверхности является основой для решения многих прикладных задач инженерной геологии, тектоники, геологии месторождений полезных ископаемых. При этом определение характера нарушения породного массива в результате процессов разрывообразования и выветривания представляет одну из главных составляющих подобных исследований. Особенно высока степень дислоцированности тектонически активных регионов, земная кора которых отличается наличием густой сети разломов, сформировавшейся в результате неоднократного воздействия со стороны эндогенных сил.

Согласно представлениям тектонофизики [1, 2], каждый разлом, кроме полосы проявления тектонитов магистрального сместителя и крупных оперяющих нарушений (подзона I), характеризуется наличием существенно более широкой по размерам зоны его динамического влияния, где имеют место сравнительно мелкие разрывы (подзона II) и периферийная трещиноватость (подзона III), сформировавшиеся при разломообразовании. Как следствие при оценке степени нарушения скальных пород ключевым моментом является исследование разломов в широком тектонофизическом понимании, тем более для зон их

динамического влияния в близповерхностной части коры характерны интенсивное выветривание и разрыхление массива вследствие разгрузки напряжений.

Среди малоглубинных геофизических методов, дополняющих структурно-геологические способы оценки нарушения скального массива, обычно применяется электроразведка, в том числе современная разновидность вертикального электрического зондирования – электротомография [3, 4]. Электротомографические исследования скальных пород в основном акцентированы на решении конкретных инженерно-геологических задач, часть из которых связана с выявлением в массиве ослабленных зон [5–9 и др.]. Особенностью подобных публикаций является анализ факторов формирования поля ρ , специфичных для конкретных объектов и регионов, а также разработка способов сбора и обработки полевой информации. Вместе с тем не меньший интерес вызывают такие особенности распределений удельного электрического сопротивления, которые должны быть свойственны широкому кругу объектов в связи с объективно существующими общими закономерностями их формирования. В плане дислоцированности скальных массивов важное значение имеет наличие у разломов широких зон динамического

влияния и их поперечно-зональное строение, характерное для большинства подобных структур в связи со стадийностью развития в земной коре.

Целью проведенного исследования было изучение методом электротомографии наиболее общих черт нарушенности скальных пород в тектонически активных регионах, отличающихся широким распространением разноранговых разломов. В качестве такого региона для проведения исследований выбрано Приольхонье в Западном Прибайкалье (рис. 1). Его территория в тектоническом отношении относится к области краевых поднятий Саяно-Байкальского складчатого пояса и представлена полихронными метаморфическими комплексами. Скальные массивы Прибайкалья характеризуются интенсивной нарушенностью и

наличием плотной сети трещин и разломов, подвижки по которым имеют место и на современном – рифтовом этапе тектогенеза. Кроме того, горные породы Приольхонья нарушены выветриванием, степень которого наиболее высока в зонах разломов. Многие из них представляют линейно вытянутые участки остаточного проявления латерит-каолиновой коры, имевшей площадное распространение в мел-палеогеновое время [10–12].

Исследования в Приольхонье были проведены на 15 участках, особенностью которых была хорошая обнаженность скальных пород, обеспечившая возможность сопоставления результатов электротомографии с прямыми оценками нарушенности пород структурно-геологическими методами. Ключевым объектом исследования в пределах 10 участков

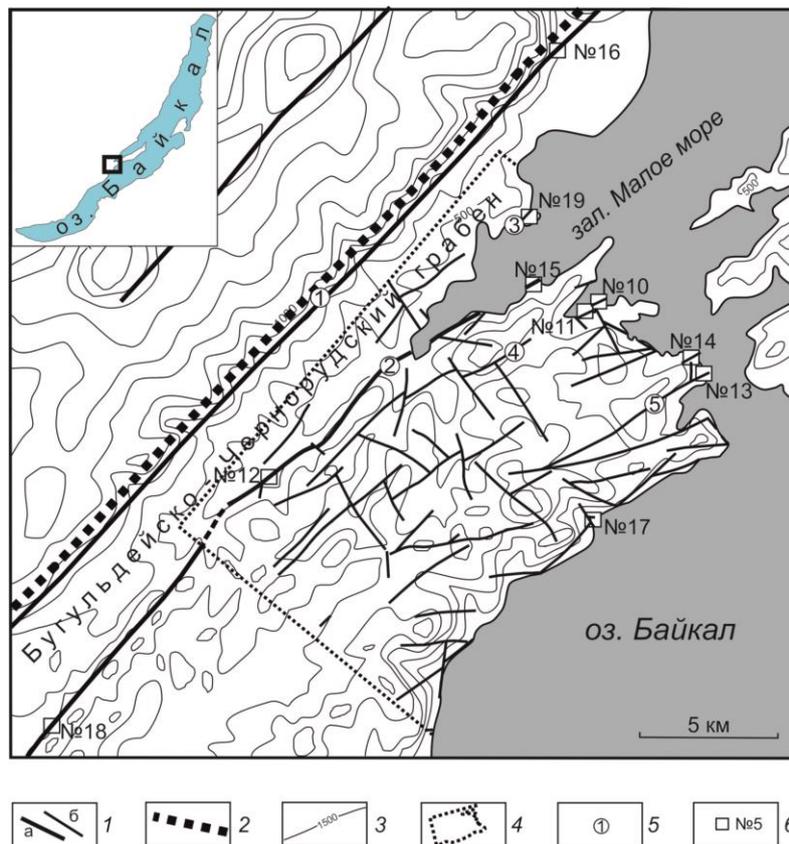


Рис. 1. Обзорная схема расположения разломов и участков проведения работ в Приольхонье (Западное Прибайкалье):

- 1 – крупные (а) и мелкие (б) разломы; 2 – краевой шов Сибирской платформы;
 3 – горизонтали рельефа; 4 – участок, в пределах которого положение разломов показано по данным структурной съемки [13]; 5 – крупные разломы Приольхонья (1 – Приморский, 2 – Тырган-Кучелгинский, 3 – Улирбинский, 4 – Куркутский, 5 – Тутайский);
 6 – участки исследования разломов

(см. рис. 1) являлся крупный или мелкий разлом, что позволяло проследить изменение степени дислоцированности геологического субстрата от его осевой части к крыльям. На нескольких участках разломы отсутствовали: работы в их пределах были направлены на определение удельного электрического сопротивления для наименее нарушенных массивов, представленных каждой из основных разновидностей горных пород Приольхонья (биотитовые гнейсы, мраморы, гранито-гнейсы, пегматиты). Таким образом, выбор объектов и организация исследований обеспечили возможность решения главной задачи – установить характер взаимосвязи удельного электрического сопротивления и степени нарушенности скальных пород в близповерхностной части земной коры Приольхонья (Западное Прибайкалье).

Методы исследований

Основными методами исследования степени нарушенности пород Приольхонья были электротомография и структурно-геологические приемы изучения скальных массивов, реализованные в профильном варианте. Каждый из 15 участков электроразведочных работ выбирался так, чтобы иметь возможность для получения полной информации о строении геологического разреза и, прежде всего, положении разломных зон. Обычно геофизический профиль располагался над высоким скальным выходом или над обрывистым (до пляжно-галечной зоны) берегом оз. Байкал, как это, например, было характерно для участка изучения Онтхойской разломной зоны (см. № 15 на рис. 1), выбранного для иллюстрации полученных результатов (рис. 2).

Задачей структурно-геологических исследований было выявить основные разновидности горных пород разреза (см. рис. 2, Б), а также особенности их нарушенности разноранговыми разрывами. Для ее решения на участках с разломными зонами использовались материалы наших предыдущих геолого-геофизических работ [14]. При этом

структурные данные были существенно дополнены: вдоль всех профилей (по возможности через одинаковые расстояния) определялись значения плотности трещин в одном погонном метре обнажения (D). Это позволяло выявить интенсивно дислоцированные интервалы разреза и менее нарушенные блоки (см. рис. 2, В-1).

Малоглубинная (≈ 40 м) электротомография осуществлялась при помощи многоэлектродной станции сопротивления «Скала-48». Методика определения ρ была отработана и опробована в ходе предшествовавших работ в Западном Прибайкалье [15]. При измерениях использовалась последовательность подключения электродов, соответствующая симметричной установке Шлюмберже с расстоянием между электродами 0,5 и 5 м. Инверсия данных электротомографии производилась робастным способом с применением программного обеспечения Res2DInv [16]. Всего в Приольхонье было восстановлено более 30 геоэлектрических разрезов, протяженность которых составляла от 100 до 235 м и увеличивалась в среднем до 700 м для региональных профилей.

С целью определения степени проницаемости верхней части породного массива для воды и газов, а также ее современной подвижности в связи с изменением напряженного состояния под действием внешних (атмосферная нагрузка) и внутренних (тектоническая нагрузка) сил применялись два вспомогательных метода исследования. Один из них – способ наливов в шурфы – осуществляется в гидрогеологии по стандартной методике [17] и позволяет определять коэффициент фильтрации (K_f , м/сут.) при миграции воды от поверхности вглубь массива (см. рис. 2, В-3). Кроме того, привлекались данные радоновой съемки (см. рис. 2, В-2), проведенной ранее [14]. Они позволили получить дополнительную характеристику разрывных структур, в частности степени их радоновой активности, которая связана с интенсивностью подвижек на

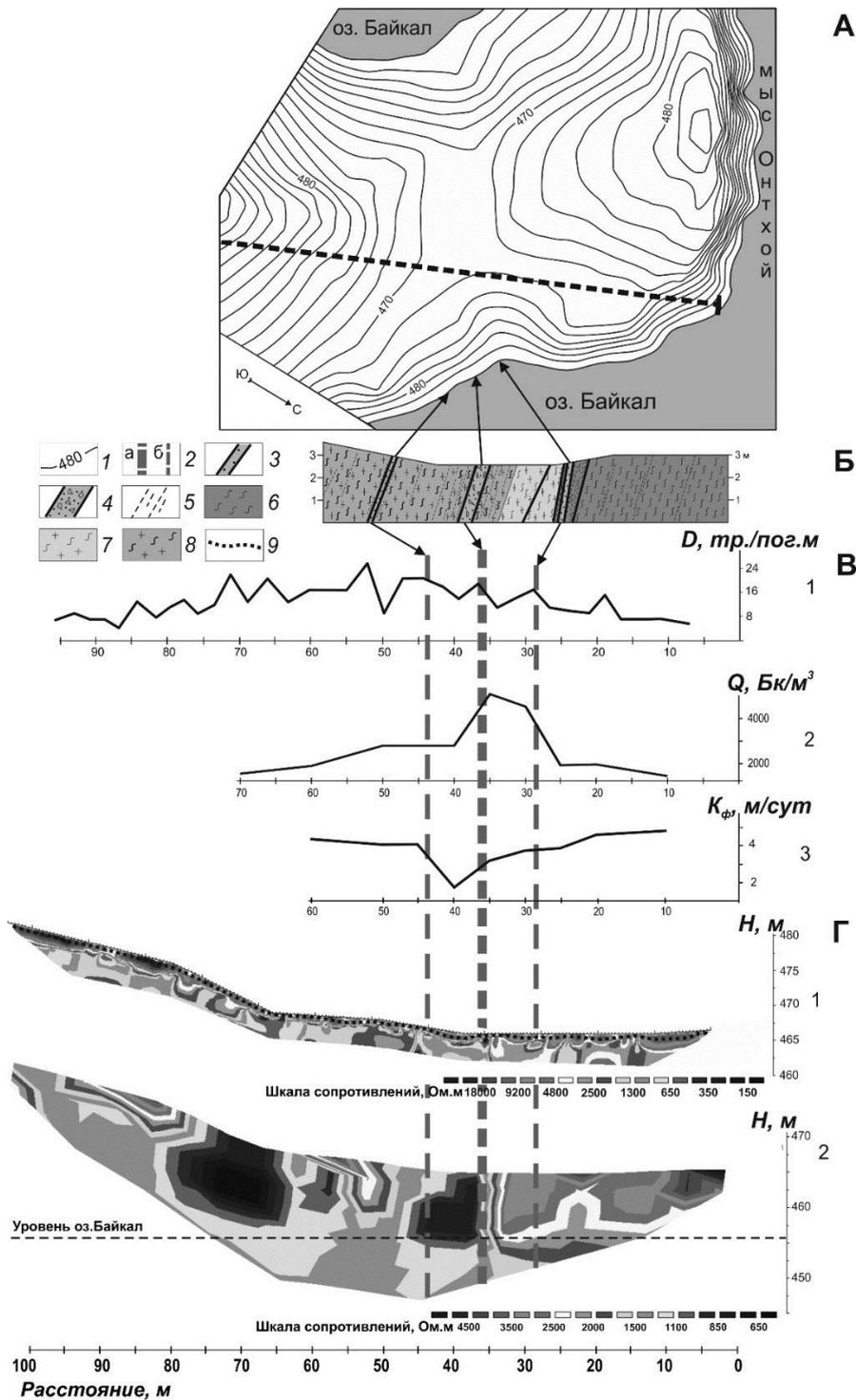


Рис. 2. Результаты комплексных исследований разломной зоны на мысе Онтхой в Приольхонье:
 А – схема горизонталей рельефа и положение профиля (пунктир), в пределах которого проводились электротомографическая и эманационная съемки, а также наливки в шурфы для определения коэффициента фильтрации воды; Б – геолого-структурный разрез, построенный по результатам изучения берегового обрыва; В – графики вариаций плотности трещин в 1 пог.м (D) коренного выхода (В-1), объемной активности радона (Q) и коэффициента фильтрации воды ($K_{\text{ф}}$);
 Г – геоэлектрические разрезы, построенные по данным электротомографии с расстоянием между электродами 0,5 м (Г-1) и 5 м (Г-2).

1 – горизонталы рельефа; 2 – трассирование положения главного (а) и второстепенных (б) сместителей разломной зоны на графики и геоэлектрические разрезы; 3–4 – второстепенные (3) и главный (4) сместители, представленный различной брекчией дробления; 5 – интенсивно трещиноватые участки коренного выхода; 6 – гнейсы; 7 – гранито-гнейсы; 8 – древние милониты; 9 – приповерхностный геоэлектрический слой с высоким удельным сопротивлением

современном этапе развития. Эманационная съемка проводилась на всех изученных площадках, а наливывы в шурфы – для четырех профилей на участках № 10, 11, 13 и 15 (см. рис. 1), что было достаточным в связи с аналогичным характером изменения K_f вкрест простирания разломных зон.

Результаты исследований

В итоге проведения работ для каждого из участков исследования были получены результаты, подобные представленным на рис. 2 для мыса Онтхой в Приольхонье. В пределах изученного берегового обрыва обнажаются биотитовые гнейсы (см. рис. 2, Б), сменяющиеся при продвижении с северо-запада на юго-восток гранито-гнейсами, которые в этой части разреза подвержены интенсивной милонитизации, свидетельствующей о переработке пород в зоне древнего разлома. Скальный массив подвержен выветриванию, особенно на участках интенсивного развития трещиноватости. Кроме трещин разрывные нарушения представлены несколькими крупными сместителями, зона сгущения которых отчетливо выражена седловиной в рельефе, отделяющей мыс Онтхой от «материка» (см. рис. 2, А, Б). Эта зона имеет байкальское северо-восточное простирание и приурочена к границе древних милонитов, что свидетельствует об унаследованном развитии разломной сети на участке исследований. Отдельные сместители сопровождаются дроблением пород вплоть до глинки трения, мощность которой у наиболее крупного из них достигает в раздувах нескольких сантиметров.

График распределения плотности трещин (см. рис. 2, В-1) свидетельствует о соответствии каждому из выявленных крупных сместителей одного из максимумов параметра D . Подобные пики, а также сместители имеют место и за юго-восточной границей доступного для прямых наблюдений коренного выхода, что позволяет оценить общую ширину разломной зоны в поле трещиноватости (≈ 60 м). Вместе с тем аномальные

концентрации почвенного радона (см. рис. 2, В-2) характерны только для северо-западной половины участка повышенной нарушенности трещинами, которая выражена седловиной в рельефе. Здесь же зафиксированы и аномально низкие значения коэффициента фильтрации воды (см. рис. 2, В-3).

Электротомографические исследования позволили изучить распределение удельного электрического сопротивления в скальном массиве мыса Онтхой с высокой степенью детальности – до глубины 5 м (см. рис. 2, Г-1) и менее подробно – до глубины 20 м (см. рис. 2, Г-2). По генерализованному геоэлектрическому разрезу отчетливо видно, что возвышающийся над уровнем оз. Байкал массив в первом приближении делится на две части: северо-западную высокоомную ($\rho > 2000$ Ом·м) и юго-восточную низкоомную ($\rho < 2000$ Ом·м), границей которых является главный сместитель разломной зоны (35 м профиля). Низкоомная часть профиля характеризуется резко неравномерным распределением удельного электрического сопротивления. Имеют место две проводящие области ($\rho < 1000$ Ом·м), которые в целом принадлежат к участку с высокой плотностью трещин (см. интервал 20–75 м на рис. 2, В-1). Одна из них (см. рис. 2, Г-2) приурочена к зоне главного разломного сместителя, выделяющейся пониженной формой рельефа, а также аномалиями в распределениях коэффициента фильтрации и активности газовых эманаций. Другой минимум параметра ρ , располагаясь у основания склона, имеет большие размеры, но не выделяется радоновой аномалией. Северо-западная высокоомная часть профиля также характеризуется неравномерным распределением удельного электрического сопротивления. Ввиду представленности одним типом пород это, по-видимому, как и для юго-восточной части, связано с их состоянием, то есть нарушенностью и влагонасыщенностью.

Это предположение подтверждается анализом близповерхностной части

породного массива, прозондированного с большей детальностью (см. рис. 2, Г-1). По главным закономерностям строения данный разрез подобен описанному выше (см. рис. 2, Г-2). Субвертикально вытянутые участки пониженного электрического сопротивления, выделяющиеся в северо-западной части разреза, могут быть обусловлены наличием небольших зон повышенной трещиноватости, зафиксированных при структурно-геологических исследованиях (см. рис. 2, Б). Кроме того, состоянием гнейсов может объясняться характерная черта детального геоэлектрического разреза: наличие полосы высоких значений ρ у поверхности (маркируется линией точек). Ее существование при круто наклонном залегании пород и отсутствии рыхлых отложений на участке исследований скорее всего является следствием обезвоживания, характерного для самой верхней части массива (1,5 м) в условиях сухого и ветреного климата Приольхонья.

Таким образом, мыс Онтхой отличается высокой нарушенностью приповерхностной части коры, обусловленной наличием разломной зоны, отражающейся в поле параметра ρ неоднородным по внутреннему строению сегментом разреза с высокой проводимостью. Онтхойская разломная зона проявляется в существовании двух участков аномально низких удельных электрических сопротивлений ($\rho < 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$): юго-восточный (см. интервал 55–80 м на рис. 2, Г-2) и северо-западный (см. интервал 35–45 м на рис. 2, Г-2). В их пределах скальный массив интенсивно нарушен за счет сгущения разломных сместителей, наличия плотной сети трещин и, следовательно, интенсивного выветривания. Разломная зона наследует древние милониты и характеризуется неравномерной тектонической активностью в кайнозое. Так, несмотря на меньшие размеры аномалии проводимости, северо-западный из выделенных участков в отличие от юго-восточного испытал активизацию на позднем кайнозое. Об этом свидетельствует серия прямых и косвенных признаков:

седловина в рельефе, максимум эманаций радона и другие.

Фактический материал и результаты, подобные описанным выше для мыса Онтхой, были получены практически для всех изученных в Приольхонье участков и послужили основой выявления характера взаимосвязи удельного электрического сопротивления и степени нарушенности скальных пород в близповерхностной части земной коры.

Обсуждение результатов

Первоочередной задачей интерпретации полученных материалов было установление фактора, определяющего формирование поля электрической проводимости скальных массивов в регионе. Среди таких факторов в данном случае следует рассматривать нарушенность пород трещинами, присутствие продуктов выветривания, проницаемость массива для газов и воды, наличие последней в свободном или связанном виде. Согласно данным по Онтхойскому участку (см. рис. 2, Б-В), низкоомные аномалии связаны с активными сегментами разломных зон (см. интервал 35–45 м на рис. 2, Г) и выделяются минимумами коэффициента фильтрации (см. рис. 2, В-3), повышенными концентрациями почвенного радона (см. рис. 2, В-2), а также высокими значениями плотности трещин (см. рис. 2, В-1). Сочетание этих признаков интерпретируется ниже исходя из известных в инженерной геологии оценок состояния скальных и рыхлых пород [18–21].

В соответствии с существующей классификацией грунтов по водопроницаемости [19] наблюдаемое на графике (см. рис. 2, В-3) снижение величины K_f с 5 до 1 м/сут. от краев профиля к центру свидетельствует о смене скальных трещиноватых пород тонко- и мелкозернистыми грунтами. Для рассматриваемого участка сгущения разрывов очевидной причиной такой поперечной зональности является наличие общей тенденции увеличения нарушенности пород от периферии разломной зоны к главному сместителю вследствие механического

разрушения при тектонических перемещениях и интенсификации выветривания. Мелкодисперсные продукты этих процессов могут быть сухими или увлажненными, но в обоих состояниях они обладают высокой электропроводностью, хотя и отличаются по роли в образовании аномалий, ассоциирующихся с разломными зонами Приольхонья.

Так, в большей части аномальных участков мелкодисперсный субстрат насыщен водой, которая в условиях мощной зоны аэрации Приольхонья находится в связанном состоянии за счет образования коагуляционных структур [20]. Сухой мелкодисперсный субстрат может создавать лишь локальные минимумы параметра ρ (см., например, отметки 35 и 65 м на рис. 2, Г-1), что следует из анализа строения тонкого обезвоженного «слоя» у самой поверхности (1,5 м), который за исключением этих небольших участков имеет высокое электрическое сопротивление. Последнее является результатом разрыхления и выдувания тонкодисперсных продуктов выветривания из разрывов в приповерхностной части породных массивов, располагающихся на мысах Приольхонья. Локальные низкоомные аномалии – места, где этот процесс, несмотря на отсутствие влаги, затруднен в связи с уплотненным состоянием глинистого субстрата, что, например, характерно для разломных сместителей, заполненных глиной трения.

Переходя к результатам сопоставления геоэлектрических разрезов и распределения концентрации радона в почве, необходимо отметить, что степень активности разлома на современном этапе тектогенеза не является значимым фактором формирования обусловленной им аномалии проводимости. Так, более крупный юго-восточный минимум на геоэлектрическом разрезе Онтхойского участка (интервал 55–80 м) не выделяется максимумом в поле концентраций радона (см. рис. 2, В-2) в отличие от меньшей по размеру северо-западной аномалии параметра ρ (интервал 35–45

м). Именно в последнем случае повышенный выход радиоактивного газа связан с увеличением поверхности эманирования вследствие истирания породы при современных подвижках в зоне сброса.

В противоположность современной активности, обязательным условием образования низкоомной аномалии является наличие в массиве высокой плотности трещин, которая характерна для всех разломных зон, изученных посредством электротомографии в Приольхонье (см. рис. 2, В-1). Интенсивная нарушенность разноранговыми разрывами способствует активному выветриванию верхней части породного массива с образованием связывающих воду тонкодисперсных частиц, что и приводит к формированию аномалии электропроводности. Таким образом, плотность трещин может рассматриваться в качестве руководящего параметра нарушенности пород, определяющего строение поля удельного электрического сопротивления в скальных массивах Приольхонья.

Этот вывод подтверждается анализом связи параметров D и ρ на базе десятков замеров их величин, полученных для мраморов, биотитовых гнейсов, гранито-гнейсов и пегматитов Приольхонья (рис. 3). Эта зависимость в логарифмических координатах аппроксимируется прямой линией: с увеличением плотности трещин электрическое сопротивление уменьшается. Как показывают расчетные данные [22], эффективная электропроводность массива может заметно изменяться даже при возникновении в нем относительно малой доли трещин. Существенное увеличение электрической проводимости массива по мере появления в нем трещин и пустот происходит за счет их заполнения минерализованной водой, связанной тонкодисперсными продуктами выветривания и истирания.

Из рис. 3 отчетливо видно, что в пределах левой части графика при одинаковой степени нарушенности пород трещинами их удельное электрическое

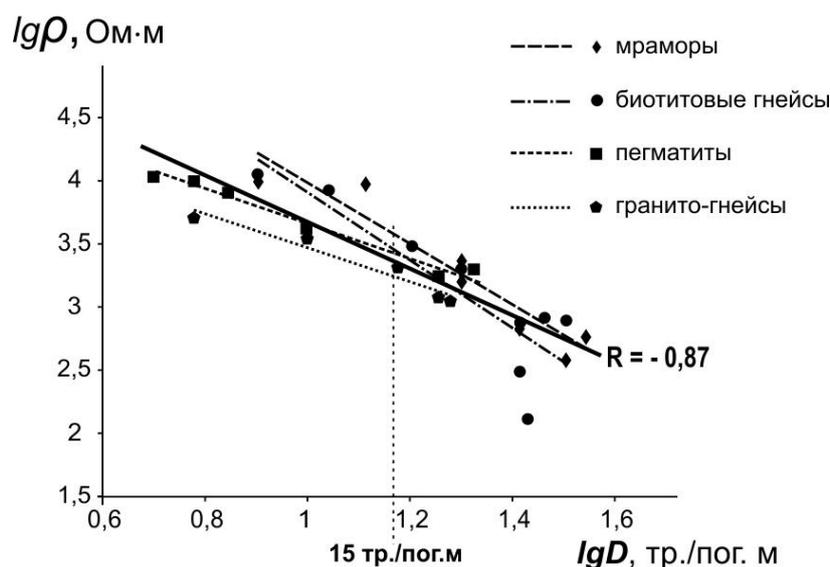


Рис. 3. График зависимости логарифма удельного электрического сопротивления ρ от логарифма плотности трещин D , составленный по данным электромографии (шаг между электродами – 0,5 м) в разнотипных породах Приольхонья

сопротивление уменьшается в ряду «мраморы – биотитовые гнейсы – пегматиты – гранито-гнейсы». Наиболее вероятной причиной установленной закономерности является не состав, а различие в структурно-механических свойствах разнотипных пород. Относительно массивные пегматиты и гранито-гнейсы отличаются от слоистых пород большей хрупкостью деформационного поведения [23] и, следовательно, при одинаковых нагрузках – большей нарушенностью трещинами, обуславливающей меньшие величины параметра ρ .

Различие в проводимости разнотипных пород при одинаковой нарушенности трещинами уменьшается с увеличением параметра D и в целом исчезает при его величинах больше 15. После этого предела символы, соответствующие на рис. 3 разным породам, перемешиваются. Таким образом, для Приольхонья тип породы при плотной сети трещин, сопровождающейся интенсивным выветриванием, не оказывает явно выраженного влияния на поле удельного электрического сопротивления. Оно в этом случае определяется главным образом нарушенностью скального массива, то есть его физическим состоянием.

Результаты применения тектоно-физического подхода к изучению

разломов и трещиноватости [2] свидетельствуют, что на многих участках Приольхонья величина $D > 15$ тр./пог.м. характерна для мест сгущения разломных сместителей (см. рис. 2, Б, В-1). Аналогичные оценки имеют место и для других тектонически активных регионов. Согласно данным С.Н. Чернышева [21], в зоне сочленения Памира и Южного Тянь-Шаня, вблизи разломных сместителей происходит сгущение трещин в 3–4 раза по сравнению с фоном, что в Приольхонье при минимальных оценках плотности в 5 тр./пог.м (см. рис. 3) примерно соответствует выявленному уровню в 15–20 тр./пог.м.

Таким образом, уровень, после превышения которого тип породы не влияет на ее электропроводность, примерно соответствует границе разломной зоны в ее широко распространенном структурно-геологическом понимании. Этот уровень выделяется в предложенной ранее [2] принципиальной тектоно-физической модели разломной зоны и включает подзону главного сместителя (I), а также подзону вторичных разрывов и повышенной трещиноватости (II). В то же время в этой модели имеет место еще один элемент строения разломной зоны – периферийная подзона III, – формирующаяся на самой ранней стадии разломо-

образования. Эта подзона больше по ширине и при традиционных структурно-геологических наблюдениях в тектонически активных регионах обычно относится к «фону»: по плотности трещин она почти не контрастирует с фоновой трещиноватостью. В поле распространения трещин отличием подзоны III от смежных участков вмещающего массива – блоков – является не столько интенсивность распространения трещин, сколько набор разрывных систем, парагенетически связанный с характером подвижек по разлому. Предварительный анализ показывает, что периферийная подзона может быть выделена и в поле удельного электрического сопротивления, что представляет задачу дальнейших целенаправленных исследований.

Сопоставление данных по изученным в Приольхонье участкам показало, что для большинства из них уровню плотности трещин $D = 15$ тр./пог.м соответствует величина $\rho = 1000$ Ом·м. Таким образом, при отсутствии данных о плотности трещин именно этот уровень ρ можно для изученной территории считать исходным при проведении на геоэлектрическом разрезе границ разломной зоны в ее традиционном понимании. В других тектонически активных регионах следует ожидать отклонений от выявленной величины, поскольку они имеют место даже в пределах Приольхонья (например, участок № 3). Причиной подобных отклонений являются отличающиеся на разных участках соотношения плотности трещин с такими факторами, как степень выветривания, влагонасыщения или хрупкости горных пород, влияющими на электропроводность. Это необходимо учитывать при использовании усредненных оценок для интерпретации материалов электротомографии в каждом конкретном случае.

Заключение

Малоглубинная электротомография, впервые использованная для исследования скальных массивов Приольхонья (Западное Прибайкалье), позволила установить специфику отражения

нарушенности пород тектонически активного региона в поле удельного электрического сопротивления ρ .

1. В регионах с многоэтапной деформационной историей при стандартных геохимических условиях главным фактором, определяющим пространственное распределение параметра ρ в верхней части скального массива, является степень его нарушенности разноранговыми разрывами. При разгрузке напряжений у поверхности данный фактор обуславливает степень «разрыхления» скального массива и, следовательно, интенсивность его выветривания. В результате этого процесса происходит образование тонкодисперсных частиц, распределение и объем которых (ввиду способности связывать воду) предопределяет характер поля удельного электрического сопротивления в зоне аэрации.

2. В центральных частях разломных зон, характеризующихся высокой плотностью трещин ($D > 15$ тр./пог.м – в Приольхонье), тип пород не оказывает явно выраженного влияния на поле удельного электрического сопротивления. Величина ρ определяется главным образом физическим состоянием скального массива и прежде всего степенью его нарушенности.

3. При небольших значениях плотности трещин электропроводность массива меняется вслед за величиной D в пять и более раз, причем по-разному у пород, различающихся по степени хрупкости деформационного поведения.

Таким образом, малоглубинная электротомография является эффективным методом оценки степени нарушенности скальных массивов в верхней части коры тектонически активных регионов. В Приольхонье для выделения границы наиболее нарушенных центральных частей разломной зоны в качестве исходного может использоваться уровень $\rho = 1000$ Ом·м. Опыт проведенного исследования свидетельствует о перспективах применения электротомографии для выделения зональности

внутреннего строения разломных зон в их широком тектонофизическом понимании.

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории геоэлектрики ИНГГ СО РАН профессору Н.О. Кожевникову и кандидату геолого-минералогических наук В.В. Оленченко за консультации по особенностям интерпретации электро-разведочных материалов, а также кандидату геолого-минералогических наук А.В. Черемных, кандидатам геолого-минералогических наук А.А. Боброву,

А.С. Черемных и другим сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН за действенную помощь в проведении электротомографии на отдельных участках Приольхонья.

Работы выполнялись при поддержке РФФИ (№ 16-05-00154).

Исследования выполнены по программе работ совместной научно-исследовательской лаборатории ИЗК СО РАН и ИРННТУ «Тектонофизика и геодинамика рудных систем».

Библиографический список

1. Шерман С.И., Борняков С.А., Буддо В.Ю. Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). Новосибирск: Наука, 1983. 112 с.

2. Семинский К.Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: основные этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 5. № 4. С. 1–43.

3. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology // Journal of Applied Geophysics. 1993. V. 29. P. 211–226.

4. Бобачев А.А., Марченко М.Н., Модин И.Н., Перваго Е.В., Урсова А.В., Шевнин В.А. Новые подходы к электрическим зондированиям горизонтально-неоднородных сред // Физика Земли. 1995. № 12. С. 79–90.

5. Ganerod G.V., Ronning J.S., Dalsegg E., Elvebakk H., Holmoy K., Nilssen B., Braathen A. Comparison of geophysical methods for sub-surface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2006. V. 65. P. 231–243.

6. Magnusson M., Fernlund J., Dahlin T. Geoelectrical imaging in the interpretation of geological conditions affecting quarry operations // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2010. № 3. P. 465–486.

7. Соколов С.Я., Рязанцев П.А.,

Климовский А.В., Нилов М.Ю. Геофизические методы изучения породной толщи на объектах облицовочного камня // Горный журнал. 2011. № 5. С. 15–19.

8. Рязанцев П.А. Комплексный геофизический профиль через Ропручейский силл габбродолеритов на участке Ржаное-Анашкино // Труды Карельского Научного центра РАН. 2012. № 3. С. 165–171.

9. Оленченко В.В., Камнев Я.К. Геоэлектрическая модель многолетне-мерзлой толщи перевала Жосалы Кезен (Илейский Алатау) по данным электротомографии // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 2. № 2. С. 1–5.

10. Домбровская Ж.В. Палеогеновая кора выветривания Центрального Прибайкалья. М.: Наука, 1973. 153 с.

11. Плешанов С.П., Ромазина А.А. Некоторые вопросы кинематики развития разломов центральной части Байкальского рифта // Проблемы разломной тектоники / под ред. Н.А. Логачева. Новосибирск: Наука, 1981. С. 129–141.

12. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 5. С. 391–406.

13. Семинский К.Ж. Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // Геофизический журнал. 2005. Т. 27. № 1. С. 85–96.

14. Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Авгулевич Д.Л. Стру-

тура разломных зон Приольхонья (Байкальский рифт) по данным полевой тектоно- и геофизики // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2008. № 7 (33). С. 111–124.

15. Зарипов Р.М. Особенности применения электротомографии при исследовании разломных зон Приольхонья (Западное Прибайкалье) // Трофимукские чтения – 2013 / под ред. М.И. Эпова. Новосибирск: Изд-во ИНГГ, 2013. С. 271–274.

16. Loke M.H. Tutorial: RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia: Geotomo Software, 2010. 148 с.

17. Справочное руководство гидрогеолога / под ред. В.М. Максимова. Л.: Недра, 1979. 512 с.

18. Ломтадзе В.В. Инженерная геология. Инженерная петрология. Л.: Недра, 1970. 528 с.

19. Маслов Н.Н., Котов М.Ф. Инженерная геология. М.: Изд-во литературы по строительству, 1971. 341 с.

20. Осипов В.И. Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 230 с.

21. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.

22. Губатенко В.П., Огаджанов В.А., Назаров А.А. Мониторинг динамики разуплотнения горных пород методами электроразведки // Физика Земли. 2000. № 9. С. 103–109.

23. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

References

1. Sherman S.I., Bornjakov S.A., Buddo V.Ju. *Oblasti dinamičeskogo vlijanija razlomov (rezul'taty modelirovaniya)* [Fault dynamic influence areas (simulation results)]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1983. 112 p.

2. Seminskii K.Zh. *Spetskartirovanie razlomnykh zon zemnoi kory. Stat'ya 2: osnovnye etapy i perspektivy* [Specialized mapping of crustal fault zones. Article 2: main stages and prospects]. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics and Tectonophysics], 2015, v. 5, no. 4, pp. 1–43.

3. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 1993, v. 29, pp. 211–226.

4. Bobachev A.A., Marchenko M.N., Modin I.N., Pervago E.V., Urusova A.V., Shevnin V.A. *Novye podkhody k elektricheskim zondirovaniyam gorizonta'no-neodnorodnykh sred* [New approaches to electrical sounding of horizontally inhomogeneous environment]. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth], 1995, no. 12, pp. 79–90.

5. Ganerod G.V., Ronning J.S., Dalsegg E., Elvebakk H., Holmoy K.,

Nilsen B., Braathen A. Comparison of geophysical methods for subsurface mapping of faults and fracture zones in a section of the Viggja road tunnel, Norway. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2006, v. 65, pp. 231–243.

6. Magnusson M., Fernlund J., Dahlin T. Geoelectrical imaging in the interpretation of geological conditions affecting quarry operations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2010, no. 3, pp. 465–486.

7. Sokolov S.Ya., Ryazantsev P.A., Klimovskii A.V., Nilov M.Yu. *Geofizicheskie metody izucheniya porodnoi tolshchi na ob'ektakh oblitsovochnogo kamnya* [Geophysical methods of rock mass research on the objects of facing stones]. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal], 2011, no. 5, pp. 15–19.

8. Ryazantsev P.A. *Kompleksnyi geofizicheskii profil' cherez Roprucheiskii sill gabbrodoleritov na uchastke Rzhano-Anashkino* [The complex geophysical cross section of the Roprucheysky gabbrodolerite sill at the Rzhano-Anashkino site]. *Trudy Karel'skogo Nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of Karelia Scientific Centre RAS], 2012, no. 3, pp. 165–171.

9. Olenchenko V.V., Kamnev Ya.K. *Geoelektricheskaya model' mnogoletnemerzloi tolshchi perevala Zhosaly Kezen (Ileiskii Alatau) po dannym elektrotomografii* [Geoelectric model of permafrost Zhosaly Kezen Pass (Ileyskiy Alatau) by results of electrical resistivity tomography]. *Interexpo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2014, v. 2, no. 2, pp. 1–5.
10. Dombrovskaya Zh.V. *Paleogenovaya kora vyvetrivaniya Tsentral'nogo Pribaikal'ya* [Paleogene weathering crust of the Central Baikal region]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 153 p.
11. Pleshanov S.P., Romazina A.A. *Nekotorye voprosy kinematiki razvitiya razlomov tsentral'noi chasti Baikalskogo rifta* [Some issues of fault development kinematics in the central part of the Baikal Rift]. *Problemy razlomnoi tektoniki* [The problems of fault tectonics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, pp. 129–141.
12. Logachev N.A. *Istoriya i geodinamika Baikalskogo rifta* [Baikal Rift history and geodynamics]. *Geologiya i geofizika* [Geology and Geophysics], 2003, v. 44, no. 5, pp. 391–406.
13. Seminskii K.Zh. *Kartirovaniye razlomno-blokovoi struktury zemnoi kory na sovremennom etape razvitiya tektonofiziki* [Mapping the crustal fault-block structure at the present development stage of tectonophysics]. *Geofizicheskii zhurnal* [Geophysical journal], 2005, v. 27, no. 1, pp. 85–96.
14. Seminskii K.Zh., Kozhevnikov N.O., Cheremnykh A.V., Bobrov A.A., Olenchenko V.V., Avgulevich D.L. *Struktura razlomnykh zon Priol'khon'ya (Baikal'skii rift) po dannym polevoi tektono- i geofiziki* [The structure of Priolkhonie fault zones (Baikal rift) based on the data of field tectonophysics and geophysics]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdenii* [Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences, Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Prospecting and Exploration of Ore Deposits], 2008, no. 7 (33), pp. 111–124.
15. Zaripov R.M. *Osobennosti primeneniya elektrotomografii pri issledovanii razlomnykh zon Priol'khon'ya (Zapadnoe Pribaikal'e)* [Features of electron tomography application in the study of Priolkhonie fault zones (Western Baikal region)]. *Trofimukovskie chteniya – 2013* [Trofimukovskie Readings]. Novosibirsk, INGG Publ., 2013, pp. 271–274.
16. Loke M.H. Tutorial: RES2DINV ver. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method. Malaysia, Geotomo Software Publ., 2010. 148 p.
17. *Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa* [Hydrogeologist's reference]. Leningrad, Nedra Publ., 1979. 512 p.
18. Lomtadze V.V. *Inzhenernaya geologiya. Inzhenernaya petrologiya* [Engineering geology. Engineering petrology.]. Leningrad, Nedra Publ., 1970. 528 p.
19. Maslov N.N., Kotov M.F. *Inzhenernaya geologiya* [Engineering geology]. Moscow, Literature on construction Publ., 1971. 341 p.
20. Osipov V.I. *Priroda prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv glinistykh porod* [The nature of the strength and deformation properties of clay rocks.]. Moscow, MGU Publ., 1979. 230 p.
21. Chernyshev S.N. *Treshchiny gornykh porod* [Rock fissures]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 240 p.
22. Gubatenko V.P., Ogadzhyanov V.A., Nazarov A.A. *Monitoring dinamiki razuplotneniya gornykh porod metodami elektrorazvedki* [Monitoring rock decompression dynamics by the methods of resistivity prospecting]. *Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth], 2000, no. 9, pp. 103–109.
23. Gzovskii M.V. *Osnovy tektonofiziki* [The basics of tectonophysics]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 536 p.

Статья поступила 25.11.2016 г.

Article received 25.11.2016.