

ГЕОФИЗИКА

УДК 551.243+550.837

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ  
МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН

К.Ж. Семинский<sup>1</sup>, Р.М. Зарипов<sup>1</sup>, В.В. Оленченко<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

<sup>2</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>3</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

На примере исследований в Приольхонье (Западное Прибайкалье) представлен новый подход к интерпретации данных малоуглубинной электротомографии разломных зон. Он основан на представлениях тектонофизики о стадийности разломообразования, предопределяющей закономерное существование в породном массиве разных уровней нарушенности субстрата. Уровни выявляются посредством статистического анализа измеренных величин удельного электрического сопротивления, что позволяет выделять на геоэлектрическом разрезе границы разломной зоны в целом и ее внутренние подзоны, связанные с формированием главного сместителя и разрывов 2-го порядка. Информация подобного типа является основой для решения прикладных и фундаментальных задач тектоники, рудной и инженерной геологии.

*Разломная зона, малоуглубинная электротомография, тектонофизика.*

INTERPRETATION OF SHALLOW ELECTRICAL RESISTIVITY IMAGES OF FAULTS:  
TECTONOPHYSICAL APPROACH

K.Zh. Seminsky, R.M. Zaripov, and V.V. Olenchenko

A new approach to interpretation of shallow electrical resistivity tomography (ERT) data discussed for the case of the Olkhon area (western Baikal region) stems from tectonophysical ideas of faulting phases and deformation levels in rocks. The deformation levels, identified statistically from ERT responses, constrain fault boundaries and subboundaries associated with the formation of main and subsidiary fault planes. Information of this kind creates a basis for solving various fundamental and applied problems of tectonics, mineral exploration, and engineering geology.

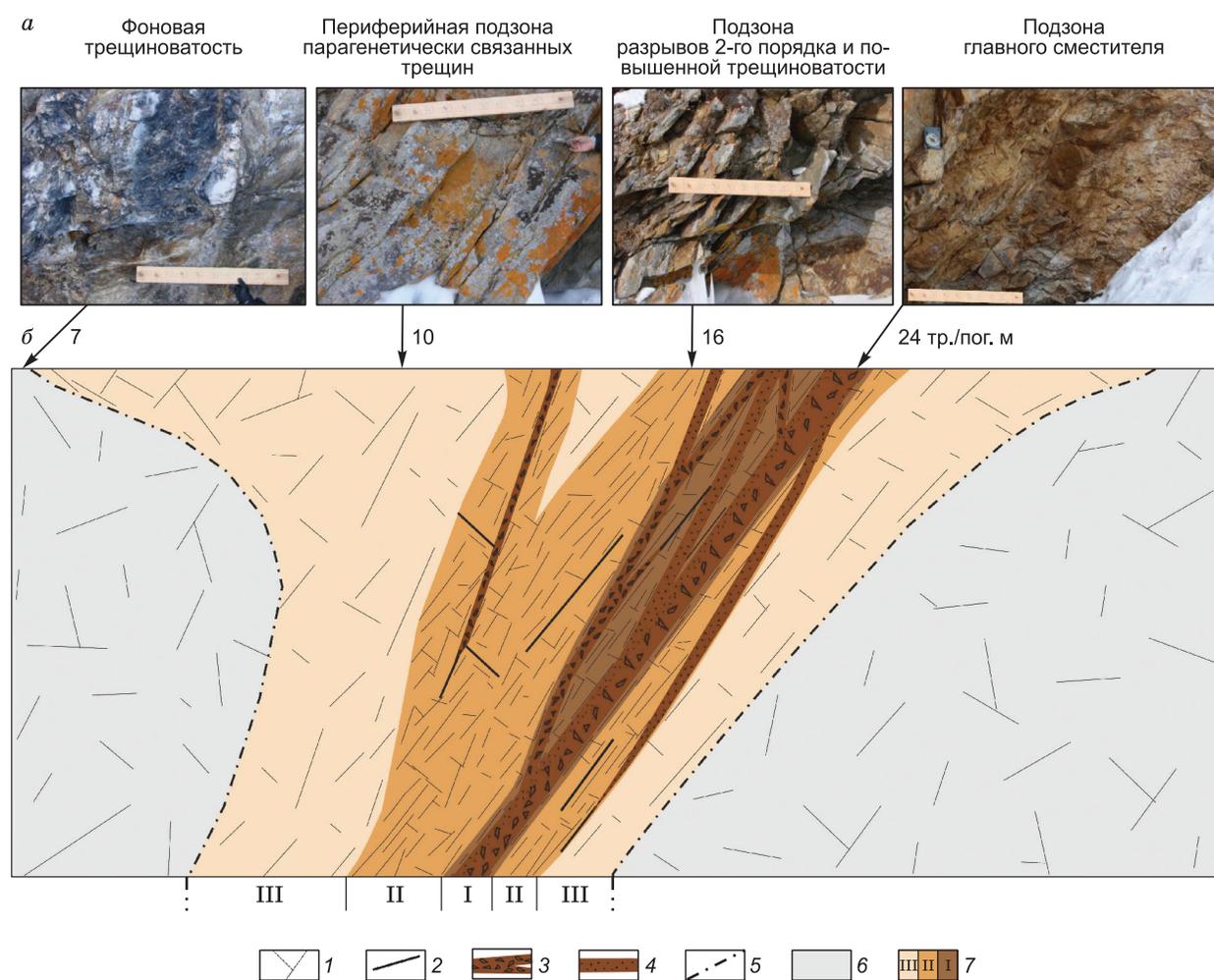
*Fault zone, shallow electrical resistivity tomography*

ВВЕДЕНИЕ

При исследованиях разломов близповерхностной части коры в настоящее время широко используется электротомография (ЭТ) [Improra et al., 2010; Kuria et al., 2010; Magnusson et al., 2010; Соколов и др., 2011; Schutze et al., 2012; Рязанцев, 2012; Carbonel et al., 2013; Оленченко, Камнев, 2014], которая является усовершенствованным вариантом вертикальных электрических зондирований [Griffiths, Barker, 1993; Бобачев и др., 1995]. Метод позволяет непосредственно в полевых условиях получать разрезы удельного электрического сопротивления (УЭС,  $\rho$ ) до глубины 40 м. Их геологическая интерпретация основана на отождествлении однородных по УЭС участков массива с определенными типами пород. При выделении тектонических нарушений на геоэлектрических разрезах линии разломов обычно проводятся в градиентных областях или в центральных частях вытянутых участков с низкими значениями УЭС. В сложнодислоцированных массивах такой подход к интерпретации без привлечения априорной информации и/или комплексирования с другими геофизическими методами, как правило, не дает однозначных результатов.

Поиски закономерностей проявления разломов в поле параметра  $\rho$  осуществляются на базе двумерного моделирования с применением его результатов к интерпретации данных ЭТ, полученных для верхней части интенсивно нарушенных скальных массивов [Reiser et al., 2009; Ronning et al., 2014]. Эти исследования имеют широкие перспективы, так как ведут к созданию комплекса формализованных критериев выделения разломных зон на геоэлектрических разрезах. В то же время данная задача осложняется тем, что дизъюнктивы как геологические тела характеризуются неравномерной нарушенностью субстрата, выступающей в качестве главной причины сложного распределения УЭС.

Согласно представлениям тектонофизики, разломные зоны, кроме полосы тектонитов магистрального сместителя, объединяют разноранговые разрывы и трещины, генетически связанные с его формированием. Полный цикл развития разлома (без начальных этапов доминирования упругости и пластичности) включает три дизъюнктивные стадии, сменяющие друг друга в процессе локализации деформации скальвания [Семинский, 2003, 2014; Семинский и др., 2013]. На ранней дизъюнктивной стадии возникает широкая зона мелких парагенетически связанных разрывов, которую в геологической практике обычно называют зоной трещиноватости, зоной скрытого разлома и пр. [Радкевич и др., 1956; Рац, Чернышев, 1970; Хренов, 1971; Макаров, Щукин, 1979; Фаворская и др., 1985; Глубинные разломы..., 1990]. На поздней дизъюнктивной стадии разлом выражен существенно меньшей по размерам зоной



**Рис. 1. Принципиальная модель внутреннего строения разломной зоны в разрезе.**

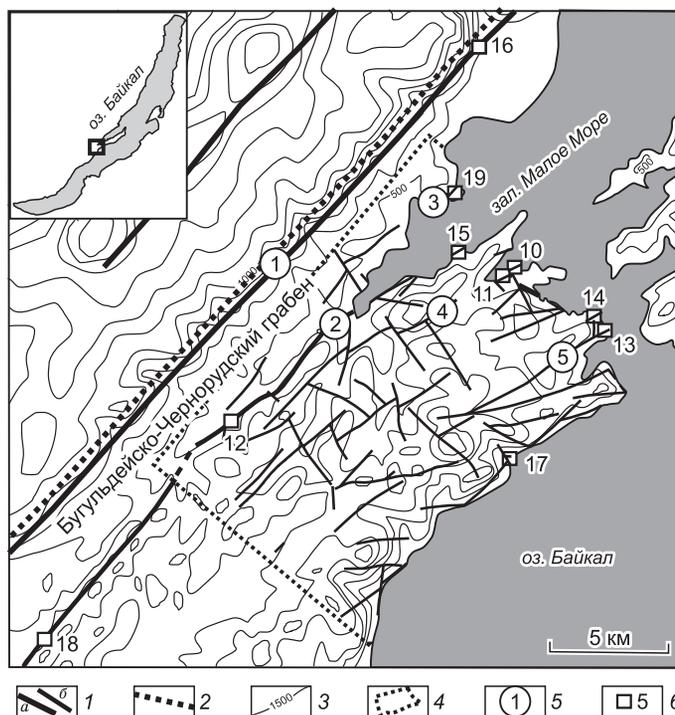
*а* — фотографии, иллюстрирующие характерные состояния трещинных сетей вблизи разломного сместителя, нарушающего породный массив на одном из участков Приольхонья в Западном Прибайкалье (масштабная линейка имеет длину 1 м, для которой получены плотности трещин, приведенные под каждой фотографией).

*б* — модель поперечной зональности разлома, прошедшего в своем развитии три главные стадии разрывообразования.

1 — трещиноватость; 2 — крупные трещины; 3 — сместитель, заполненный брекчией дробления; 4 — сместитель, заполненный глиной трения; 5 — внешняя граница разломной зоны; 6 — слабонарушенный породный массив; 7 — главные элементы внутреннего строения разломной зоны, сформировавшиеся на разных стадиях разрывообразования: III — периферийная подзона парагенетически связанных трещин; II — подзона разрывов 2-го порядка и повышенной трещиноватости; I — подзона главного сместителя.

**Рис. 2. Обзорная схема расположения разломов и участков проведения электротомографических и геолого-структурных исследований 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 [Семинский, 2005]; 5 — крупные разломы Приольхонья (1 — Приморский, 2 — Тырган-Кучелгинский, 3 — Улирбинский, 4 — Куркутский, 5 — Тутайский); 6 — участки исследования разломов и их порядковые номера.



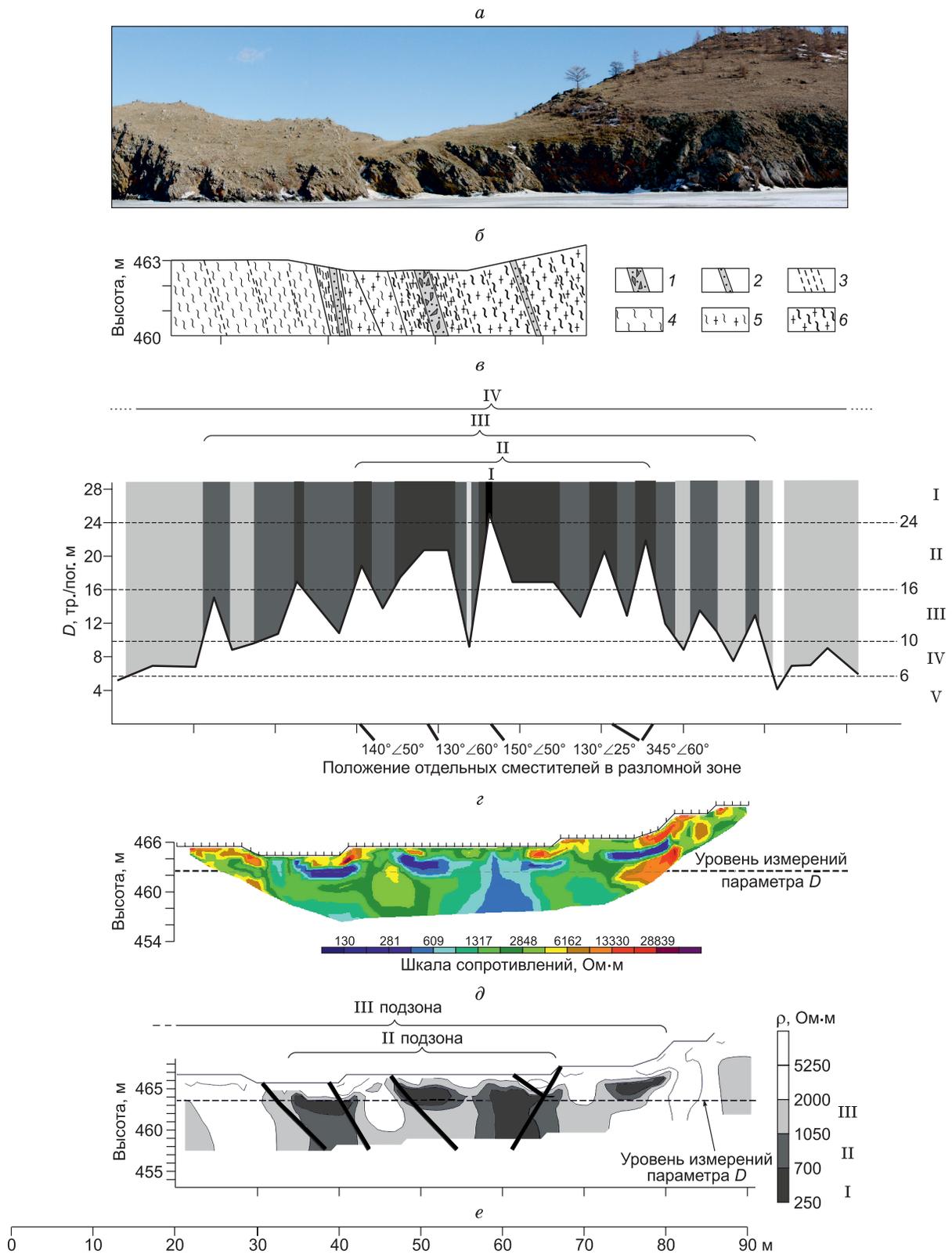
распространения активных разрывов, представленных небольшими фрагментами магистрального сместителя, между которыми расположены интенсивно нарушенные области их взаимодействия. Разлом стадии полного разрушения представлен единым магистральным сместителем и крупными разломами оперения с тектонитами «рыхлого» типа (глинка трения, брекчия дробления и пр.).

Вследствие стадийности разломообразования зона динамического влияния разрывного нарушения в тектонически-активном регионе имеет поперечно-зональное строение за счет наложения структур разных стадий (рис. 1). При этом в направлении от оси к крыльям происходит смена подзон, соответствующих стадии полного разрушения (I), ранней (II) и поздней (III) дизъюнктивным стадиям. Представленная зональность закономерным образом проявляется в наличии разных уровней нарушенности породного массива. Это должно отражаться на геоэлектрических разрезах, поскольку в естественных условиях поле УЭС определяется наличием вмещающих влагу пор, пустот, трещин и более крупных разрывов.

Цель исследования заключалась в разработке основ тектонофизического подхода к интерпретации материалов электротомографии разломных зон, нарушающих скальные массивы в тектонически-активном регионе. Для ее достижения решались следующие задачи: 1) провести в Западном Прибайкалье (Приольхонье) электротомографические исследования и получить геоэлектрические разрезы для серии эталонных разломов, строение которых изучено прямыми геолого-структурными методами; 2) установить на базе количественной обработки полученных материалов характер взаимосвязи удельного электрического сопротивления и степени нарушенности скальных пород трещинами в близповерхностной части земной коры Приольхонья; 3) предложить теоретическое обоснование и содержание тектонофизического подхода к анализу материалов ЭТ, направленной на выявление границ и особенностей строения разломных зон.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Приольхонский регион (Западное Прибайкалье), выбранный в качестве полигона для проведения исследований (рис. 2), относится к области краевых поднятий Саяно-Байкальского складчатого пояса. Породы представлены полихронными метаморфическими комплексами и почти повсеместно характеризуются субвертикальным залеганием. Согласно исследованиям предшественников [Соотношение..., 1979; Разломообразование..., 1992, 1994; Mats, 1993; Delvaux et al., 1995, 1997; Леви и др., 1997; Логачев, 2003; Structural..., 2005; Семинский и др., 2013; Макрыгина и др., 2014; и др.], они претерпели несколько этапов интенсивных деформаций, среди которых для постпротерозойского времени выделяют раннепалеозойское сжатие, раннекайнозойский сдвиг и позднекайнозойское растяжение земной коры. Как следствие, скальные массивы Приольхонья характеризуются интенсивной нарушенностью, что проявляется в наличии плотной сети трещин и разломов, подвижки по которым на последнем этапе тектогенеза — формирование Байкальского рифта — способствуют растяжению коры в направлении СЗ-ЮВ.



**Рис. 3. Результаты применения тектонофизического подхода к обработке геолого-структурных и электротомографических данных, полученных для профиля, пересекающего эталонную разломную зону м. Онтхой в Приольхонье (Западное Прибайкалье).**

*а* — фотография разломной зоны м. Онтхой, проявляющейся серией волноприбойных ниш и ложбиной в рельефе.  
*б* — геолого-структурный разрез, построенный по результатам изучения фрагмента берегового обрыва на м. Онтхой: 1, 2 — сместители, представленные брекчией дробления (1) или глинок трения (2); 3 — интенсивно трещиноватые участки коренного выхода; 4 — гнейсы; 5 — гранитогнейсы; 6 — древние милониты.

$\epsilon$  — вариации вдоль профиля значений плотности трещин в 1 пог. м ( $D$ ). На графике оттенками серого и черным цветом выделены участки, для которых степень нарушенности пород трещинами превышает четыре выделенных статистическим способом предела параметра  $D$  (штриховые линии). Скобки над графиком — генерализованные границы фрагментов массива, которые по нарушенности трещинами относятся к I, II, III, IV или V уровням, выделенным согласно результатам анализа распределений параметра  $D$ ; под графиком — положение и элементы залегания составляющих зону разломных сместителей.

$\epsilon$ ,  $\rho$  — геоэлектрические разрезы, построенные по данным ЭТ вдоль профиля над береговым обрывом м. Онтхой со стандартным набором изолиний ( $\epsilon$ ), а также с изолиниями, проведенными по значениям  $\rho$  ( $\rho$ ), выделенным при статистической обработке массива данных. Скобки над графиком — генерализованные границы фрагментов массива, которые по электропроводности относятся к II и III уровням, выделенным согласно результатам анализа распределений параметра  $\rho$ ; черные линии — предполагаемое положение разломных сместителей.

$e$  — отметки расстояния вдоль профиля (для рис. б—д).

Исследования в Приольхонье проводились на 11 участках (см. рис. 2), в пределах которых объектами изучения были крутопадающие дизъюнктивы, участвующие в строении бортов крупных и мелких кайнозойских впадин. На большей части участков, представляющих обрывистые берега оз. Байкал (№ 10, 11, 13, 15, 17 и 19), разломы детально изучались прямыми геолого-структурными методами. Это позволило в рамках данного исследования считать их эталонными. В остальных случаях (участки № 12, 14, 16, 18, 20) присутствие разлома определялось по наличию уступа в рельефе, что в тектонически-активном регионе свидетельствует о положении сместителя. Некоторые из них представляли крупные разломы Приольхонья (см. рис. 2), в том числе Приморский и Тырган-Кучелгинский сбросы, формирующие Бугульдейско-Чернорудский грабен.

Участки с эталонными объектами выбирались так, чтобы нарушенность скальных пород и, в частности, присутствие разломной зоны, предопределяло строение поля УЭС. Так, по-возможности, был исключен вещественный фактор: участки № 10, 11, 13, 15, 17 и 19 располагались вне Чернорудской тектонической зоны, где причиной формирования низкоомных аномалий является присутствие графита, создающего протяженные электрически-проводящие системы [Кожевников, 1998]. Во-вторых, эти участки находились в местах с почти полным отсутствием рыхлых наносов, осложняющих интерпретацию геоэлектрического разреза в скальном массиве. Кроме того, ЭТ на всех участках проводилась в летнее время, когда минимален эффект промораживания массива, создающий на геоэлектрических разрезах высокоомные аномалии.

Основными методами изучения характера нарушенности пород Приольхонья были электротомография и структурно-геологические приемы изучения скальных массивов, реализованные в профильном варианте. Местоположение каждого из участков изучения эталонных разломных зон выбиралось так, чтобы получить возможно более полную информацию о строении геологического разреза. 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 № 15 на м. Онтхой (см. рис. 2). Онтхойский участок используется в статье для иллюстрации полученных результатов (рис. 3), поскольку они отражают закономерности, установленные для эталонных объектов в ходе реализации главных методов исследования.

Задачей структурно-геологических исследований было выявление основных разновидностей пород разреза, а также особенностей их нарушенности разноранговыми разрывами. На участках изучения эталонных объектов (см. рис. 3, б) в береговых обрывах обычно обнажаются граниты, гранитогнейсы, разнотипные гнейсы, мраморы, а также породы, преобразованные в зонах докембрийских разломов (милониты, катаклазиты и пр.). Концентрация напряжений на подобных древних неоднородностях привела в последующие тектонические эпохи к возобновлению подвижек и формированию разломных зон «хрупкого типа», которые на большинстве участков имеют северо-восточное (байкальское) простирание (см. рис. 3, б, в). Они отчетливо выражены в рельефе ложбинами (см. рис. 3, а), образовавшимися вследствие эрозии и выветривания скальных пород, интенсивно нарушенных трещинами и разрывами со смещением.

Отдельные сравнительно крупные сместители проявлены в скальных выходах зонками дробления пород вплоть до глинки трения, мощность которой в раздувах может достигать нескольких сантиметров. Для исследования пространственных вариаций степени нарушенности пород вдоль геолого-структурных разрезов (по возможности — через одинаковые расстояния) определялись значения плотности трещин в одном погонном метре обнажения ( $D$ ). Полученные графики свидетельствуют о соответствии максимумов параметра  $D$  каждому из крупных сместителей, составляющих внутреннюю структуру эталонных разломных зон (см. рис. 3, в). Тектонофизические реконструкции с применением методик М.В. Гзовского [1975] и П.Н. Николаева [1992] позволили сделать вывод о сбросовом характере подвижек у дизъюнктивов, имеющих северо-восточное простирание. Это в совокупности с отчетливой вы-

раженностью в рельефе свидетельствует об активности эталонных разломных зон в позднем кайнозое на рифтовом этапе преобразования земной коры.

Задачей электротомографии было получить для объектов исследования двумерные распределения УЭС (геоэлектрические разрезы) до глубины 40—50 м или с большей степенью детальности — до глубин 10 м (см. рис. 3, *з*) и 5 м в зависимости от расстояния между электродами. Методика зондирования и построения геоэлектрических разрезов отработана и апробирована в ходе предшествовавших работ в Западном Прибайкалье [Зарипов, 2013]. ЭТ осуществлялась при помощи многоэлектродной станции Скала-48. При измерениях использовалась последовательность подключения электродов, соответствующая симметричной установке Шлюмберже с расстоянием между электродами 0,5, 1 и 5,0 м. Инверсия данных ЭТ производилась с применением программного обеспечения Res2DInv [Loke, 2010]. Всего для 11 участков Приольхонья было построено несколько десятков геоэлектрических разрезов, протяженность которых составляла от 70 до 5000 м в зависимости от степени детальности и ранга изучаемой разломной зоны.

Характерной особенностью полученных геоэлектрических разрезов является широкий диапазон изменения УЭС — от единиц до первых десятков тысяч Ом·м (см. рис. 3, *з*), что обусловлено различиями в степени нарушенности и влагонасыщенности скального массива. На мысовых участках самая верхняя часть разреза (глубина до 1,5—2,0 м), как правило, представляет зону аэрации и в летний период находится в маловлажном состоянии с соответствующими ему повышенными и высокими значениями  $\rho$  (2000—10000 Ом·м). УЭС нижней части разреза, определяющееся в целом влажностью пород, отражает нарушенность массива, обусловленную строением изучаемой разломной зоны. Здесь интенсивно дислоцированные участки вследствие обводнения и наличия глинистых продуктов выветривания выделяются областями с минимальными УЭС (до единиц Ом·м). Более массивные блоки характеризуются величинами  $\rho$ , равными в среднем 5000—7000 Ом·м.

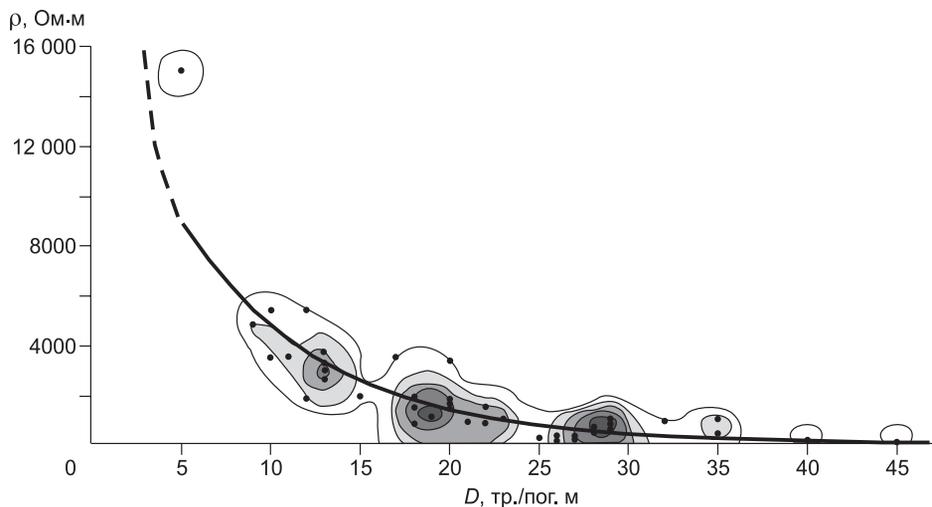
Пространственные взаимоотношения низкоомных аномалий и высокоомных доменов являются ключом для выявления по геоэлектрическим разрезам закономерностей строения разломных зон. Однако для этого необходимо обосновать критерии определения их границ на базе сопоставления проводимости и нарушенности изученных породных массивов.

#### **ВЗАИМОСВЯЗЬ ПЛОТНОСТИ ТРЕЩИН И УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В СКАЛЬНЫХ МАССИВАХ ПРИОЛЬХОНЬЯ**

На первом этапе исследования был проанализирован график зависимости величины УЭС от плотности трещин (рис. 4). Фактическим материалом для его построения послужили несколько десятков значений параметров  $\rho$  и  $D$ , определенных на эталонных участках Приольхонья, где геолого-структурные и геоэлектрические разрезы были поинтервально согласованы друг с другом. Как следует из графика, связь между удельным электрическим сопротивлением и плотностью трещин в первом приближении носит экспоненциальный характер. Это согласуется с расчетными данными [Губатенко и др., 2000], свидетельствующими о заметном изменении эффективной электропроводности массива даже при возникновении в нем относительно малой доли трещин. В условиях естественного залегания электропроводность горной породы увеличивается по мере появления в ней трещин и пустот, которые заполняются водой, связанной тонкодисперсными продуктами выветривания и истирания, что в последние годы показано и на материалах ЭТ [Ganerod et al., 2006; Danielsen, Dahlin, 2009; Magnusson et al., 2010; Ronping et al., 2014]. Таким образом, для интенсивно дислоцированной коры Приольхонского региона плотность трещин является информативным показателем нарушенности пород, который определяет поле параметра  $\rho$  в близповерхностной части скальных массивов.

Кроме установленного характера связи параметров  $\rho$  и  $D$ , особенностью рис. 4 является неравномерное расположение точек вдоль аппроксимирующей кривой, подчеркнутое рисунком изолиний их плотности. Не считая отдельно расположенных точек, выделяются четыре главных максимума, что отражает наличие у скальных массивов Приольхонья разных уровней нарушенности, каждому из которых соответствуют определенные значения  $\rho$  и  $D$ . Об этой закономерности свидетельствуют и результаты второго этапа обработки данных, заключавшегося в анализе распределения значений каждого из анализируемых параметров в отдельности.

На гистограммах параметра  $D$  (рис. 5, *а*), построенных для каждого из участков исследования эталонных разломов, можно выделить пять уровней плотности трещин (I—V). В пределах каждого из них замеры параметра  $D$  встречаются примерно с одинаковой частотой, не считая единичных «отскоков», которые ввиду обособленного положения рассматривались как исключения. Один из уровней (III) характеризуется максимальной частотой встречаемости значений, а четыре других образуют симметричные пары на каждой из нисходящих ветвей в целом близкого к нормальному распределения величин  $D$ . На гистограмме, объединяющей замеры плотности трещин в изученных береговых обрывах (см.



**Рис. 4. График зависимости удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) от плотности трещин ( $D$ ), выявленной по данным электротомографии (шаг между электродами 0.5 м) в разнотипных породах Приольхонья.**

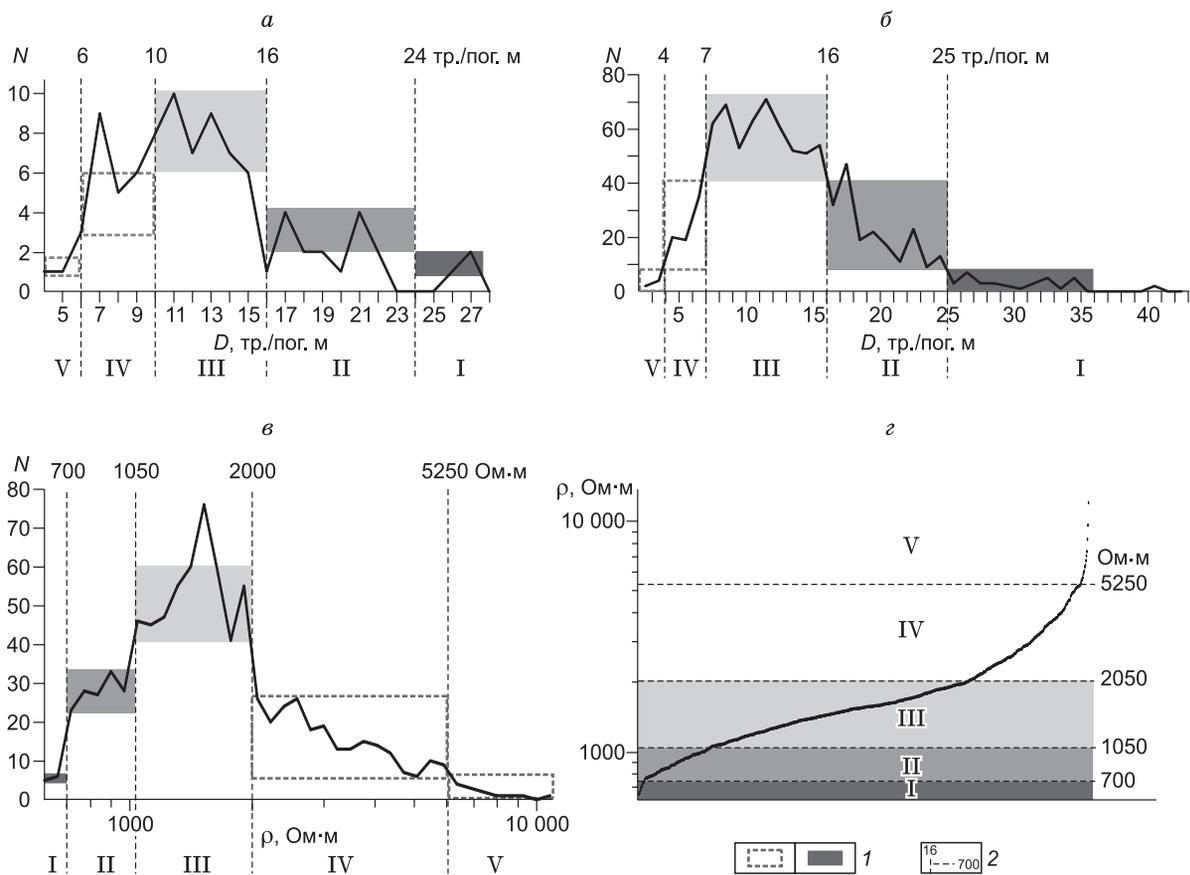
Изолинии иллюстрируют неравномерное распределение плотности точек вдоль экспоненты.

рис. 5, б), пять описываемых уровней вследствие увеличения объема выборки выделяются более отчетливо. Таким образом, в региональном масштабе усредненные значения  $D$ , разделяющие на мысовых участках Приольхонья уровни нарушенности пород V, IV, III, II и I, составляют 4, 7, 16 и 25 тр./пог. м.

Для получения распределений УЭС обрабатывались массивы электротомографических данных, используемых при построении геоэлектрических разрезов на каждом из участков исследований в Приольхонье. Анализ соответствующих им гистограмм позволяет, как и для плотности трещин, выделить пять уровней (I—V). На примере Онтхойского участка видно, что логарифм  $\rho$  имеет распределение (см. рис. 5, в), подобное распределению параметра  $D$  (см. рис. 5, а). Область максимальных значений УЭС составляет уровень III, а уровни II и IV, а также I и V представляют симметричные пары на нисходящих ветвях в целом нормального распределения изучаемого параметра. Пять характерных отрезков также выделяются, если массив данных представить в виде графика иного вида, расположив значения  $\rho$  в порядке возрастания через одинаковые интервалы по оси абсцисс (см. рис. 5, з). Отрезки получившейся кривой отделяются друг от друга точками перегиба и аппроксимируются линиями разного наклона, что отражает «скорость нарастания» величин УЭС в массиве. Наибольшие наклоны к оси абсцисс имеют отрезки I и V, средние — отрезки II и IV, а наименьший — отрезок III, так как представляющие данный уровень значения УЭС наиболее распространены в береговом обрыве м. Онтхой, нарушенном разломной зоной. Границы между уровнями значений  $\rho$ , выделяющиеся при анализе графиков разного вида (см. рис. 5, в, з), аналогичны. Однако для других участков Приольхонья подобное соответствие наблюдается не для всех уровней УЭС, что необходимо принимать во внимание при выделении пограничных значений.

Сопоставление распределений параметра  $\rho$  для различных участков Приольхонья свидетельствует о существовании характерных особенностей проявления пяти выделяющихся уровней (рис. 6). Во-первых, гистограммы отличаются в качественном отношении, о чем свидетельствует наличие трех основных форм распределения. Симметричные кривые (см. рис. 6, а) встречаются в ограниченном числе геолого-структурных ситуаций. В большинстве случаев уровни отличаются размером характерного интервала изменений УЭС и количеством значений, представляющих его в выборке. На графиках это проявляется в виде неодинаково развитых правой или левой ветвей (см. рис. 6, б, в). Во-вторых, гистограммы с разных участков отличаются в количественном отношении: абсолютные значения параметра  $\rho$ , соответствующие одинаковым уровням, варьируют в широких пределах, о чем свидетельствует различие пограничных величин на трех представленных гистограммах, типичных для района исследований.

Причиной установленных отличий является то, что, кроме формирующего структуру разломной зоны геодинамического фактора, УЭС близповерхностной части скального массива зависит от вещественного состава, а также природно-климатических условий, определяющих степень увлажнения и выветривания горных пород. Их вариации существенны даже в пределах сравнительно небольшой террито-



**Рис. 5. Графики, иллюстрирующие наличие для скальных массивов Приольхонья пяти уровней значений плотности трещин ( $D$ ) и удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ).**

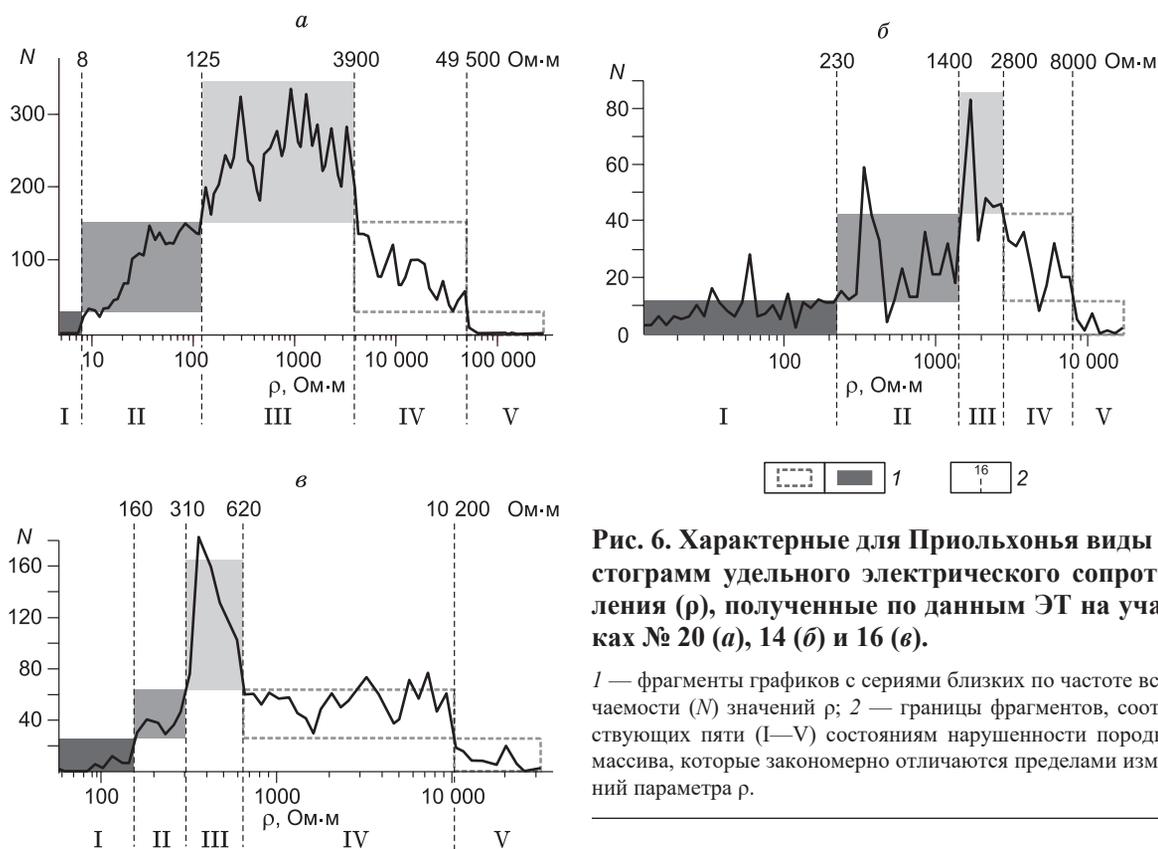
$a$  — гистограмма распределения параметра  $D$  для Онтхойского участка (№ 15);  $б$  — гистограмма распределения параметра  $D$ , построенная по данным замеров на трех участках (№ 14, 15 и 19);  $в$  — гистограмма распределения параметра  $\rho$  для Онтхойского участка (№ 15);  $г$  — график распределения  $\rho$ , на котором значения данного параметра расположены в порядке возрастания через одинаковые расстояния по оси абсцисс. 1 — фрагменты графиков с сериями близких по частоте встречаемости ( $N$ ) значений  $D$  или  $\rho$ ; 2 — границы фрагментов, соответствующих пяти (I—V) состояниям нарушенности породного массива, которые закономерно отличаются пределами изменений параметров  $D$  и/или  $\rho$  вследствие постадийного формирования разломной зоны.

рии Приольхонья. Как следствие, выявление характерных особенностей распределения параметра  $\rho$  необходимо осуществлять для каждого участка в отдельности с последующим сопоставлением результатов.

В целом количественная обработка полученных данных показала, что параметр  $D$ , характеризующий степень нарушенности массива, и величина удельного электрического сопротивления тесно взаимосвязаны. Это проявляется в виде обратной экспоненциальной зависимости величин и, главное, — подобии их распределений на качественном уровне. Последнее заключается в существовании для каждого из параметров, измеренных в массиве с разломной зоной, пяти четко различающихся уровней значений, отражающих разную степень нарушенности субстрата разрывами. Данная эмпирическая зависимость может быть использована в качестве основы нового подхода к интерпретации материалов ЭТ, однако для этого следует обосновать ее существование исходя из известных закономерностей разрывообразования.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА К АНАЛИЗУ МАТЕРИАЛОВ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН

В связи с наличием на каждом из участков проведения работ тектонического нарушения происхождение пяти уровней нарушенности, установленных при обработке структурных и электротомографических измерений, должно быть связано с зональностью разломного строения. Ее принципиальная модель (см. рис. 1, б) свидетельствует о существовании в массиве, по крайней мере, четырех уровней нарушенности, один из которых соответствует вмещающей породе, а три других относятся к разломной



**Рис. 6.** Характерные для Приольхонья виды гистограмм удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ), полученные по данным ЭТ на участках № 20 (а), 14 (б) и 16 (в).

1 — фрагменты графиков с сериями близких по частоте встречаемости ( $N$ ) значений  $\rho$ ; 2 — границы фрагментов, соответствующих пяти (I—V) состояниям нарушенности породного массива, которые закономерно отличаются пределами изменений параметра  $\rho$ .

зоне, отражая увеличение степени дислоцированности субстрата на каждой стадии разрывообразования. Анализ данных о положении сместителей и доменов с разными уровнями параметра  $D$  в пределах эталонных разломных зон Приольхонья позволил для каждой из них установить конкретный вид структурной зональности, а затем оценить степень ее отражения на геоэлектрическом разрезе. Суть построений и их основные результаты иллюстрируются на примере Онтхойского участка (см. рис. 3), для которого были представлены особенности выделения уровней параметров  $\rho$  и  $D$  (см. рис. 5, а, в, г).

Конкретный вид структурной зональности разлома, изученного на м. Онтхой, устанавливался посредством анализа особенностей пространственного распределения фрагментов скального массива со следующими уровнями плотности трещин (тр./пог. м): V — менее 6, IV — 6—9, III — 10—15, II — 16—23 и I — более 23 (см. рис. 3, в). Рис. 1, а иллюстрирует строение трещинных сетей, для которых оценки параметра  $D$  составили 7, 10, 16 и 24 тр./пог. м. Сопоставление местоположения выделенных фрагментов с геолого-структурным разрезом, построенным для доступной с суши части берегового обрыва (см. рис. 3, б), показало, что один из сместителей разломной зоны ассоциируется с первым уровнем нарушенности (I), а два других — со вторым (II), не имеющим сплошного распространения на профиле. Крайний левый фрагмент массива, относящийся к уровню II (интервал профиля 22—23 м), может быть связан с одной из выявленных здесь зон повышенной трещиноватости. Это позволяет предположить, что домены с аналогичной степенью нарушенности, находящиеся за границей геологического разреза (инт. 58—62 и 64—67 м), также ассоциируются со сместителями или зонами трещиноватости. Уровень III подобно уровню II характеризуется дискретностью проявления на профиле и соответствует фрагментам массива, где, судя по структурным наблюдениям, могут присутствовать крупные трещины с небольшими смещениями или следами скольжения на поверхностях. Блоки массива с низкой степенью нарушенности ( $D < 10$  тр./пог. м) располагаются на краях профиля, причем в их пределах имеют место небольшие прочные включения (гранит-аплит, мигматит) с редкой сетью трещин ( $D < 6$  тр./пог. м).

Установленная на примере Онтхойского участка неоднородность распределения плотности трещиноватости является характерной особенностью тектонически-активных регионов [Чернышов, 1983; Micarelli et al., 2003; Danielsen, Dahlin, 2009]. Соседство фрагментов скального массива, отличающихся по параметру  $D$ , затрудняет выделение сравнительно однородных доменов, соответствующих блокам или разломным зонам. В то же время известно, что в одной структурной ситуации зона разлома (1-й порядок) наряду с повсеместным распространением нарушенного субстрата включает небольшие монолитные блоки (2-й порядок), а в другом случае — крупный блок (1-й порядок) содержит небольшие

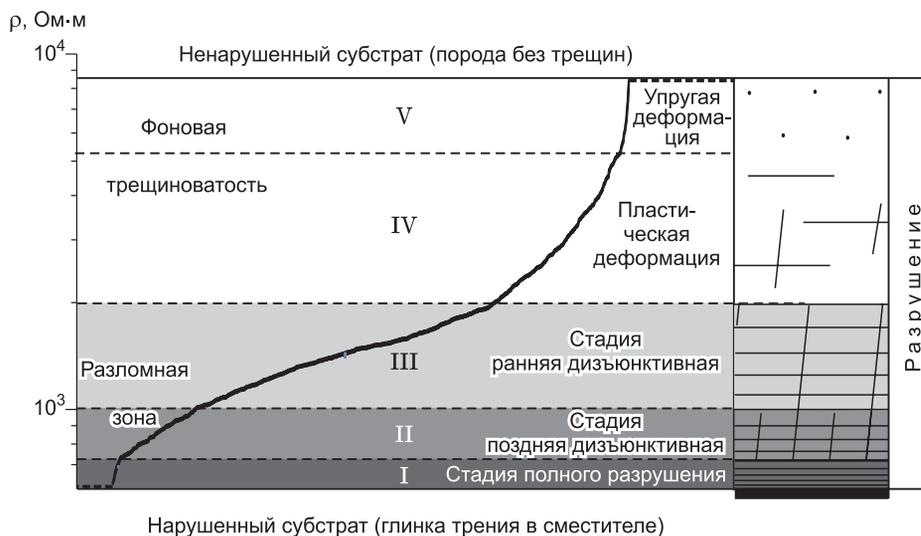
разломные сместители (2-й порядок). Это позволяет в качестве способа формализованной генерализации использовать сопоставление размеров фрагментов с разной степенью нарушенности и считать, что меньший из них является частью большего.

Этот принцип был применен для выявления зонального строения эталонных разломных зон Приольхонья, причем отдельно для каждого из выделенных уровней плотности трещин. Как видно из рис. 3, в, на Онтхойском участке к уровням II, III и IV, кроме фрагментов с  $D \geq 16$ ,  $D \geq 10$  и  $D \geq 6$  тр./пог. м, были отнесены небольшие промежуточные отрезки профиля со значениями плотности трещин, меньшими 16 (для II), 10 (для III) и 6 тр./пог. м (для IV). Основанием для этого явилось то, что их размеры были меньше одного или обоих из располагающихся рядом смежных участков профиля с  $D \geq 16$  тр./пог. м для уровня II,  $D \geq 10$  тр./пог. м для уровня III и  $D \geq 6$  тр./пог. м для уровня IV. Результат генерализации показан в верхней части рис. 3, в фигурными скобками и, согласно описанной выше структурной характеристике фрагментов массива с разными уровнями нарушенности, позволяет считать значение  $D = 10$  тр./пог. м внешней границей эталонной разломной зоны Онтхойского участка. Она имеет зональность, сформировавшуюся в течение трех стадий разломообразования (I—III), и выделяется на фоне скального массива, в котором плотность трещин соответствует уровню IV и в редких случаях наличия монолитных включений — уровню V.

Структурная зональность, установленная для каждого из эталонных участков, была сопоставлена с геоэлектрическими разрезами, построенными в изолиниях, значения которых соответствовали границам уровней I—V, выявленным ранее по гистограммам параметра  $\rho$ . Для Онтхойского участка полученная картина распределения УЭС (см. рис. 3, д) у поверхности настолько соответствует строению разломной зоны (см. рис. 3, в), насколько это возможно в условиях влияния на величину  $\rho$ , кроме степени нарушенности массива, его неравномерной увлажненности. Главным является совпадение генерализованных границ у наиболее крупных по размеру подзон II и III, выявленных для высотного уровня измерений плотности трещин и обозначенных над геоэлектрическим разрезом горизонтальными фигурными скобками. Что касается подзоны I, то дополнительно к фрагменту массива, выявленному по параметру  $D$ , на геоэлектрическом разрезе выделяются еще три домена с аналогичной степенью нарушенности субстрата. Пространственно они ассоциируются со сместителями, составляющими характерный профиль строения сбросовой зоны (см. рис. 3, в). Причем, если сравнивать фрагменты по размерам, то значимым следует считать сместитель с элементами залегания  $345^\circ \angle 60^\circ$ . Он остался за границами геолого-структурного разреза (см. рис. 3, б), но проявлен в виде уступа на фотографии м. Онтхой, сделанной со льда оз. Байкал (см. рис. 3, а).

Удовлетворительное сходство поперечной зональности разломов, полученных в результате единообразного подхода к анализу данных ЭТ и структурных измерений, а также обусловленность последних известной из тектонофизики стадийностью разломообразования позволяет отразить вариации УЭС в нарушенном массиве горных пород в виде обобщенной диаграммы (рис. 7). Ее основу составляет кривая (см. рис. 5, г), построенная на основе того же массива данных, что и гистограмма (см. рис. 5, в), но являющаяся более наглядной для характеристики стадий нарушенности массива горных пород. Как отмечалось ранее, этот график представляет результат объединения отдельных замеров  $\rho$ , расположенных в порядке возрастания параметра. Верхний и нижний отрезки кривой, показанные жирной штриховой линией ввиду фиксирования на единичных участках, являются уровнями, отделяющими практически ненарушенный (порода без трещин с  $\rho$  в десятки и сотни тысяч Ом·м) и полностью нарушенный (глинка трения в сместителе с  $\rho = 3—30$  Ом·м) субстрат от основной области диаграммы, отражающей стадии разрушения массива. Структура разрывной сети, соответствующая отдельным стадиям, схематично показана на диаграмме справа (см. рис. 7).

Удельные электрические сопротивления на отрезках графика V и IV относятся к фону и отражают области доминирования соответственно упругой и пластической деформаций. Для них характерно существенное (до первых тысяч Ом·м) уменьшение УЭС при появлении в массивной породе микротрещин (V) и макротрещин (IV). Их редкая сеть, по-видимому, может включать и разрывы нетектонического происхождения (планетарная трещиноватость и пр.). Значения УЭС на отрезке III относятся к разломной зоне, так как отражают степень нарушенности массива на ранней стадии ее формирования. Данный уровень нарушенности в тектонически-активных регионах из-за наложения разновозрастных этапов деформации наиболее распространен (соответствующий отрезок кривой — пологий). В совокупности с отсутствием крупных разрывных смещений это объясняет решение об отнесении породных фрагментов с уровнем III к фону, которое обычно принимается геологами в ходе структурных исследований. Величины  $\rho$ , соответствующие отрезку II, менее распространены в массиве, так как отражают нарушенность пород на более поздней стадии ее развития, когда уже произошла локализация деформации. Это проявляется в увеличении плотности трещин и образовании крупных сместителей с «рыхлыми» тектонитами. Низкие значения УЭС на отрезке I обусловлены субстратом, насыщенным низкоом-



**Рис. 7.** Обобщенная диаграмма распределения значений  $\rho$  в порядке их возрастания, отражающая наличие пяти (I—V) состояний нарушенности породного массива (справа — упрощенный вид разрывных сетей), которые имеют место в пределах близповерхностного участка земной коры с разломной зоной, прошедшей все стадии формирования.

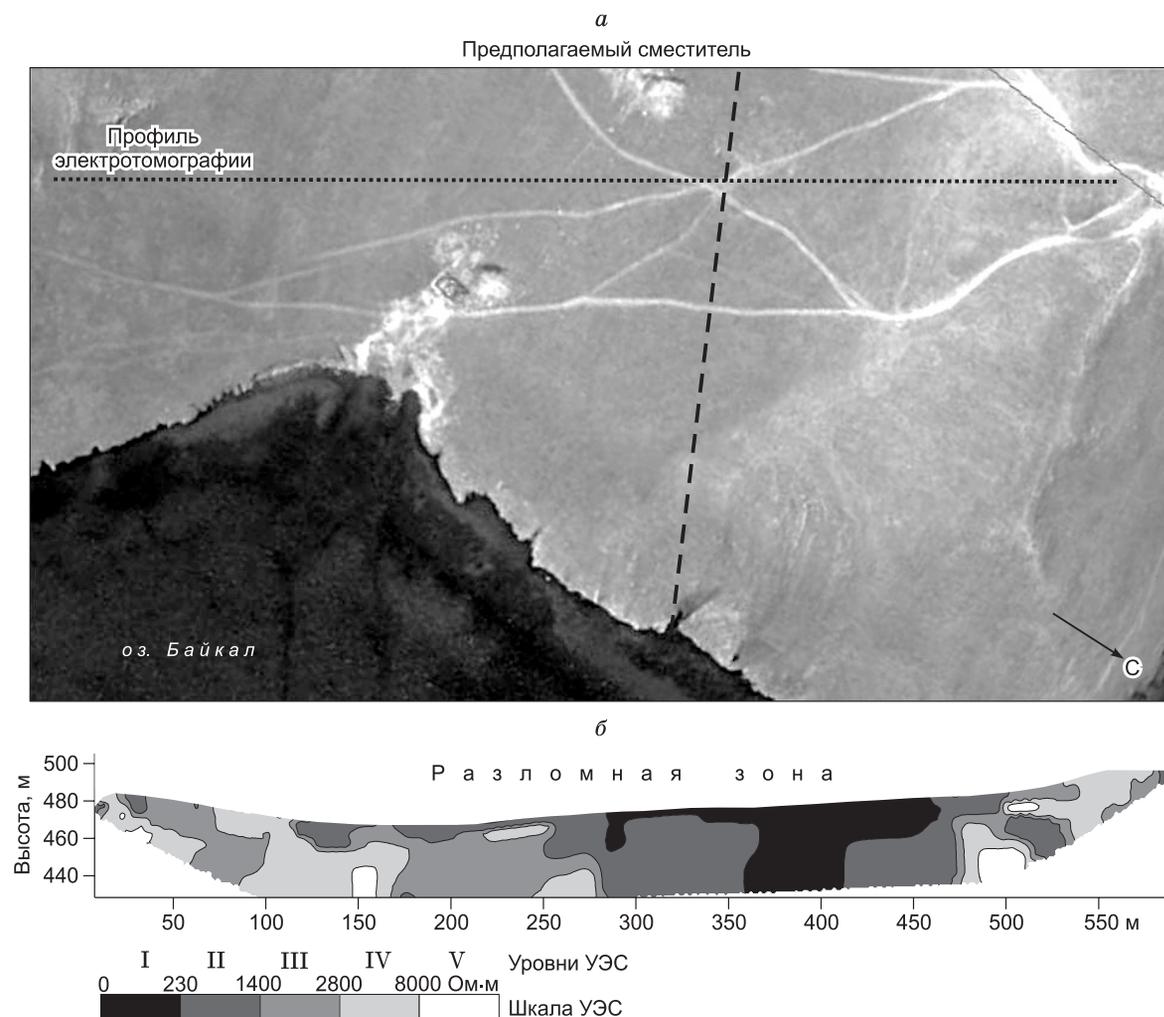
Пояснение см. в тексте.

ными продуктами дробления, образующимися на стадии полного разрушения при перемещениях по крупным разрывам оперения и главному сместителю.

Представленная диаграмма составляет теоретическую основу тектонофизического подхода к интерпретации данных ЭТ в тектонически-активных регионах. Практическая реализация подхода и заключается в следующем.

Особенностью полевого этапа, предваряющего интерпретационные построения, является выбор положения профиля(ей) и детальности ЭТ, который определяется ориентацией разлома, его рангом и задачами исследования. В общем случае профиль должен располагаться поперек простирания разлома и перекрывать зону его влияния, проявляющуюся в косвенных признаках (отрицательная линейная форма рельефа, интервал структурных изменений в отдаленном коренном выходе и пр.). Проведение измерений и их первичная обработка осуществляются по стандартной методике. Интерпретация полученных материалов основывается на результатах специальной обработки замеров УЭС. Вначале строится гистограмма частоты их встречаемости в выборке, по форме полученного графика выделяются пять уровней нарушенности субстрата, определяется положение соответствующих им частей породного массива на геоэлектрическом разрезе. Затем выполняется генерализация с выделением границ разломной зоны и ее наиболее нарушенных фрагментов, сформировавшихся на поздней и заключительной стадиях разломообразования.

Разработанный подход был применен при интерпретации ЭТ для пяти участков Приольхонья (№ 12, 14, 16, 18 и 20), где о присутствии разлома свидетельствуют только косвенные признаки (см. рис. 2). Задача выделения внешних границ и внутренней зональности изучаемого дизъюнктива была решена на всех площадях, что иллюстрируется ниже на примере участка № 14. Профиль ЭТ располагался в 250 м от берегового обрыва (рис. 8, а), где посредством прямых структурных наблюдений был зафиксирован главный сместитель тектонического нарушения. Геоэлектрический разрез до глубины  $\approx 40$  м был построен по результатам съемки ЭТ с расстоянием между электродами 5 м (см. рис. 8, б). Изолинии распределения УЭС проведены по значениям 230, 1400, 2800 и 8000 Ом·м, которые являются границами пяти уровней данного параметра, судя по гистограмме, соответствующей профилю (см. рис. 6, б). На разрезе (см. рис. 8, б) среди фоновых значений УЭС (уровни IV и V) выделяется разломная зона с характерной внутренней зональностью, что видно даже без генерализации разреза. Подзона главного сместителя (уровень I) сменяется в направлении крыльев подзоной разрывов 2-го порядка и повышенной трещиноватости (уровень II), а затем периферийной подзоной парагенетически связанной трещиноватости (уровень III). Ширина подзон вследствие разгрузки напряжений и выветривания увеличивается к поверхности. Особенно резко это происходит на глубинах 15—20 м и придает зоне характерный «грибоподобный» профиль.



**Рис. 8.** Геоэлектрический разрез (*б*), полученный в рамках нового подхода к интерпретации материалов ЭТ для одного из разломов Приольхонья, который показан на космоснимке в пределах участка № 14 (*а*), характеризующегося слабой обнаженностью горных пород.

Уровни изолиний отделяют фрагменты разреза, соответствующие пяти (I—V) состояниям нарушенности породного массива, выделенным по гистограмме распределения параметра  $\rho$ .

Таким образом, тестирование нового подхода к интерпретации материалов ЭТ свидетельствует о его эффективности при изучении характера нарушенности скального массива до глубины 40—50 м. В пределах участков, недоступных для прямых структурных наблюдений, установлены внешние границы разломных зон, выделены подзоны главного сместителя (I), разрывов 2-го порядка (II) и периферийной трещиноватости (III). При этом результаты анализа их формы и размеров в сравнении со слабонарушенными блоками согласуются с известными особенностями пространственной неравномерности деструкции в тектонически-активном регионе. В то же время необходимо отметить, что Приольхонье по условиям проведения ЭТ во многом отличается от других регионов, где картина связанного с разломами распределения параметра  $\rho$  может быть осложнена влиянием факторов нетектонического происхождения (наличие чехла рыхлых отложений, участков оруденения, обводнения, промерзания пород и пр.). Как следствие, развитие нового способа интерпретации материалов ЭТ предполагает его широкую апробацию на примере разных регионов, а также применение полученного опыта для разработки важных деталей подхода, основы и содержание которого представлены в данной статье.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малоглубинная электротомография методом сопротивлений была реализована на 11 участках распространения разломов в Приольхонье (Западное Прибайкалье). Анализ полученных материалов с

позиций тектонофизики разломообразования позволил решить поставленные перед исследованием задачи и получить следующие результаты.

1. Геоэлектрическое строение близповерхностной части скального массива в изученном тектонически-активном регионе определяется степенью его нарушенности разноранговыми разрывами. При наличии общей тенденции уменьшения УЭС ( $\rho$ ) с увеличением плотности трещин ( $D$ ) по экспоненциальному закону существуют пять уровней нарушенности скального массива, которым соответствуют определенные пределы изменения величин  $\rho$  и  $D$ . Согласно гистограммам распределения этих параметров, установленная закономерность в качественном виде (число уровней) проявляется практически на всех исследованных участках, хотя ее количественное выражение (значения уровней) меняется в зависимости от конкретных геологических и ландшафтно-климатических условий.

2. Анализ геоэлектрических разрезов по профилям, пересекающим эталонные разломы Приольхонья, строение которых было предварительно изучено структурными методами, позволил каждому из выделенных уровней поставить в соответствие определенное состояние разрывной сети скального массива. Установлено, что уровни V и IV с низкой электропроводностью характерны для небольших массивных блоков или пород с фоновой трещиноватостью, располагающихся за границами разломных зон. Уровни I—III с низкими значениями УЭС представляют разломные зоны в широком тектонофизическом понимании данного термина, согласно которому традиционно выделяющиеся приосевая подзона главного сместителя (I) и подзона вторичных опережающих разрывов и повышенной трещиноватости (II) окружены по периферии широкой областью распространения парагенетически связанных трещин (III).

3. Установленная структурная зональность положена в основу нового подхода к интерпретации материалов малоглубинной ЭТ, направленной на выявление разломных зон в регионах, где применение прямых структурных методов затруднено или невозможно. Разработанный подход в достаточной степени формализован и на первом этапе состоит в построении гистограммы распределения параметра  $\rho$ , ее анализе с выделением пяти уровней нарушенности субстрата и затем — в определении положения соответствующих им участков породного массива на геоэлектрическом разрезе. На втором этапе выполняется генерализация разреза с выделением границ разломной зоны и ее наиболее нарушенных фрагментов, которые относятся к приосевым подзонам I и II, сформировавшимся на поздней и заключительной стадиях разломообразования. Эта информация необходима для решения многих прикладных и фундаментальных задач тектоники, рудной и инженерной геологии.

Новый подход к интерпретации материалов ЭТ показал высокую эффективность при исследовании строения разломных зон Приольхонья, перекрытых рыхлыми отложениями. Это позволяет рекомендовать данный подход к применению в других регионах, что будет способствовать его дальнейшему совершенствованию.

Авторы благодарны коллегам по лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН кандидатам геол.-мин. наук А.В. Черемных и А.А. Боброву, инженерам Ю.П. Бурзуновой и А.С. Черемных за помощь в сборе и обработке полевых данных, а также академику М.И. Эпову за ценные советы и замечания, высказанные в ходе подготовки материалов к публикации.

Работа частично поддержана РФФИ (грант 16-05-00154).

## ЛИТЕРАТУРА

**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.

**Гзовский М.В.** Основы тектонофизики. М., Наука, 1975, 536 с.

**Глубинные разломы и их роль в строении и развитии земной коры / А.В. Пейве.** Избранные труды. М., Наука, 1990, 352 с.

**Губатенко В.П., Огаджанов В.А., Назаров А.А.** Мониторинг динамики разуплотнения горных пород методами электроразведки // Физика Земли, 2000, № 9, с. 103—109.

**Зарипов Р.М.** Особенности применения электротомографии при исследовании разломных зон Приольхонья (Западное Прибайкалье) // Трофимукские чтения-2013 / Ред. М.И. Эпов. Новосибирск, ИНГГ СО РАН, 2013, с. 271—274.

**Кожевников Н.О.** Некоторые особенности структуры Приольхонья по данным электроразведки (Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (2), с. 271—276.

**Леви К.Г., Аржанникова А.В., Буддо В.Ю., Кириллов П.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Саньков В.А.** Современная геодинамика Байкальского рифта // Разведка и охрана недр, 1997, № 1, с. 10—20.

**Логачев Н.А.** История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (5), с. 391—406.

- Макаров В.И., Щукин Ю.К.** Оценка активности скрытых разломов // Геотектоника, 1979, № 1, с. 96—109.
- Макрыгина В.А., Толмачева Е.В., Лепехина Е.Н.** История кристаллизации палеозойских гранитоидов по цирконам (SHRIMP-II), Ольхонский регион, озеро Байкал // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (1), с. 41—55.
- Николаев П.Н.** Методика тектонодинамического анализа / Ред. Н.И. Николаев. М., Недра, 1992, 295 с.
- Оленченко В.В., Камнев Я.К.** Геоэлектрическая модель многолетнемерзлой толщи перевала Жосалы Кезен (Илейский Алатау) по данным электротомографии // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2014, т. 2, № 2, с. 1—5.
- Радкевич Е.А., Томсон И.Н., Горлов Н.В.** О региональных поясах и зонах повышенной трещиноватости // Советская геология, 1956, № 58, с. 170—185.
- Разломообразование** в литосфере / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков, А.Н. Адамович, Р.М. Лобацкая, С.В. Лысак, К.Г. Леви. Новосибирск, Наука, 1992 (Зоны растяжения), 240 с.; 1994 (Зоны сжатия), 263 с.
- Рац М.В., Чернышев С.Н.** Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М., Недра, 1970, 164 с.
- Рязанцев П.А.** Комплексный геофизический профиль через Ропручейский силл габбро-долеритов на участке Ржаное—Анашкино // Тр. Карельск. Научн. центра РАН, 2012, № 3, с. 165—171.
- Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 243 с.
- Семинский К.Ж.** Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // Геофизический журнал, 2005, т. 27, № 1, с. 85—96.
- Семинский К.Ж.** Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: теоретические основы и принципы // Геодинамика и тектонофизика, 2014, т. 5, № 2, с. 445—467.
- Семинский К.Ж., Кожевников Н.О., Черемных А.В., Поспеева Е.В., Бобров А.А., Оленченко В.В., Тугарина М.А., Потапов В.В., Зарипов Р.М., Черемных А.С.** Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных // Геодинамика и тектонофизика, 2013, т. 4, № 3, с. 203—278.
- 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.
- Соотношение** древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне / С.М. Замаараев, Е.П. Васильев, А.М. Мазукабзов, В.В. Ружич, Г.В. Рязанов. Новосибирск, Наука, 1979, 126 с.
- Фаворская М.А., Волчанская И.К., Сапожникова Е.Н., Виноградов И.В., Курчавов А.М., Бапкина В.А., Шилин Н.Л.** Тектоника, магматизм и оруденение сквозных систем нарушений. М., Наука, 1985, 166 с.
- Хренов П.М.** Скрытые зоны глубинных разломов складчатых областей и платформ (на примере юга Восточной Сибири) // Глубинные разломы юга Восточной Сибири и их металлогеническое значение / Ред. П.М. Хренов. М., Наука, 1971, с. 5—38.
- Чернышев С.Н.** Трещины горных пород. М., Наука, 1983, 240 с.
- Carbonel D., Gutiérrez F., Linares R., Roqué C., Zarroca M., McCaIpin J., Guerrero J., Rodríguez V.** Differentiating between gravitational and tectonic faults by means of geomorphological mapping, trenching and geophysical surveys. The case of the Zenzano Fault (Iberian Chain, N Spain) // Geomorphology, 2013, v. 189, № 1, p. 93—108.
- Danielsen B.E., Dahlin T.** Comparison of geoelectrical imaging and tunnel documentation at the Hallands Tunnel, Sweden // Engin. Geol., 2009, v. 107, p. 118—129.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Melnikov A., Ermikov V.** Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // Tectonophysics, 1995, v. 252, p. 61—101.
- Delvaux D., Moyes R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnitchenko A., Ruzhich V., San'kov V.** Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // Tectonophysics, 1997, v. 282, p. 1—38.
- Ganerod G.V., Ronning J.S., Dalsegg E., Elvebakk H., Holmoy K., Nilsen 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 // Bull. Eng. Geol. Environ., 2006, v. 65, p. 231—243.
- Griffiths D.H., Barker R.D.** Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology // J. Appl. Geophys., 1993, v. 29, p. 211—226.

**Improta L., Ferranti L., De Martini P.M., Piscitelli S., Bruno P.P., Burrato P., Civico R., Giocoli A., Iorio M., D'Addezio G., Maschio L.** Detecting young, slow-slipping active faults by geologic and multidisciplinary high-resolution geophysical investigations: A case study from the Apennine seismic belt, Italy // *J. Geophys. Res.*, 2010, v. 115, B11307, doi:10.1029/2010JB000871.

**Kuria Z.N., Woldai T., van der Meer F.D., Barongo J.O.** Active fault segments as potential earthquake sources: Inferences from integrated geophysical mapping of the Magadi fault system, southern Kenya Rift // *J. African Earth Sci.*, 2010, v. 57, p. 345—359.

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

**Magnusson M., Fernlund J., Dahlin T.** Geoelectrical imaging in the interpretation of geological conditions affecting quarry operations // *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2010, № 3, p. 465—486.

**Mats V.D.** The structure and development of the Baikal rift depression // *Earth Sci. Rec.*, 1993, v. 34, p. 81—118.

**Micarelli L., Moretti I., Daniel J.M.** Structural properties of rift-related normal faults: the case study of the Gulf of Corinth, Greece // *J. Geodyn.*, 2003, v. 36, p. 275—303.

**Reiser F., Dalsegg E., Dahlin T., Ganerod G.V., Ronning J.S.** Resistivity modelling of fracture zones and horizontal layers in bedrock // *Geol. Survey Norway*, 2009, Report № 2009.070, 120 p.

**Ronning J.S., Ganerod G.V., Dalsegg E., Reiser F.** Resistivity mapping as a tool for identification and characterisation of weakness zones in crystalline bedrock: definition and testing of an interpretational model // *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 2014, v. 73, p. 1225—1244.

**Structural** and tectonic correlation across the Central Asia orogenic collage: North-Eastern segment (Guidebook and abstract volume of the Siberian Workshop IGCP-480) / Ed. E.V. Sklyarov. Irkutsk, IES SB RAS, 2005, 291 p.

**Schutze C., Vienken T., Werban U., Dietrich P., Finizola A., Leven C.** Joint application of geophysical methods and Direct Push-soil gas survey for the improved delineation of buried fault zones // *J. Appl. Geophys.*, 2012, v. 82, p. 129—136.

*Рекомендована к печати 28 августа 2015 г.  
М.И. Эповым*

*Поступила в редакцию  
1 апреля 2015 г.*