

УДК 551.243+550.837

## ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ МАЛОГЛУБИННОЙ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ РАЗЛОМНЫХ ЗОН: ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКИЙ ПОДХОД

© 2015 г. К. Ж. Семинский, Р. М. Зарипов, В. В. Оленченко

Представлено академиком РАН М.И. Эповым 18.06.2014 г.

Поступило 08.07.2014 г.

В статье рассмотрен новый подход к интерпретации данных малоуглубинной электротомографии разломных зон, который основан на представлениях тектонофизики об их стадийном формировании, предопределяющем 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.

DOI: 10.7868/S0869565215280221

При современных исследованиях активных разломов земной коры на слабо обнаженных территориях широко используется малоуглубинная электротомография (ЭТ) (см. [1–4] и др.), являющаяся усовершенствованным вариантом вертикальных электрических зондирований. ЭТ позволяет непосредственно в полевых условиях получать разрезы удельного электрического сопротивления (УЭС) горных пород. Их геологическая интерпретация основана на отождествлении однородных по УЭС участков с отдельными типами пород. При этом разломы обычно проводятся в градиентных областях разреза или в центральных частях линейризованных участков низкого электрического сопротивления. В сложнодислоцированных массивах такой подход к интерпретации без привлечения априорной информации и/или комплексирования с другими геофизическими методами, как правило, не дает однозначных результатов. Это, в частности, является следствием того, что разломы представляют геологические тела, характеризующиеся неравномерной нарушенностью субстрата, которая выступает в качестве главной

причины сложного пространственного распределения УЭС ( $\rho$ ).

Согласно представлениям тектонофизики, разломные зоны объединяют разноранговые разрывы и трещины, генетически связанные с формированием магистрального сместителя. Полный цикл развития разлома (кроме начальных этапов с эффектами упругости и пластичности) включает три дизъюнктивные стадии, сменяющие друг друга в процессе локализации деформации скальвания [5, 6]. На ранней дизъюнктивной стадии возникает широкая зона сравнительно мелких разрывов, которую в геологической практике обычно называют зоной повышенной трещиноватости, зоной скрытого разлома и пр. На поздней дизъюнктивной стадии разлом выражен существенно меньшей по размерам зоной распространения активных разрывов, представленных небольшими фрагментами магистрального сместителя, между которыми расположены значительно нарушенные области их взаимодействия. Разлом с т а д и и полного разрушения представлен единым магистральным сместителем и крупными разломами оперения с тектонитами “рыхлого” типа (глинки трения, брекчии дробления и пр.). Как следствие, в тектонически активных регионах разломные зоны имеют поперечно-зональное строение за счет наложения структур разных стадий. При этом в направлении от оси к крыльям происходит смена подзон, соответствующих стадиям полного разрушения (I), поздней (II) и ранней (III) дизъюнктивным стадиям. Представлен-

*Институт земной коры  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Иркутск*

*E-mail: seminsky@crust.irk.ru*

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики  
им. А.А. Трофимука  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск*

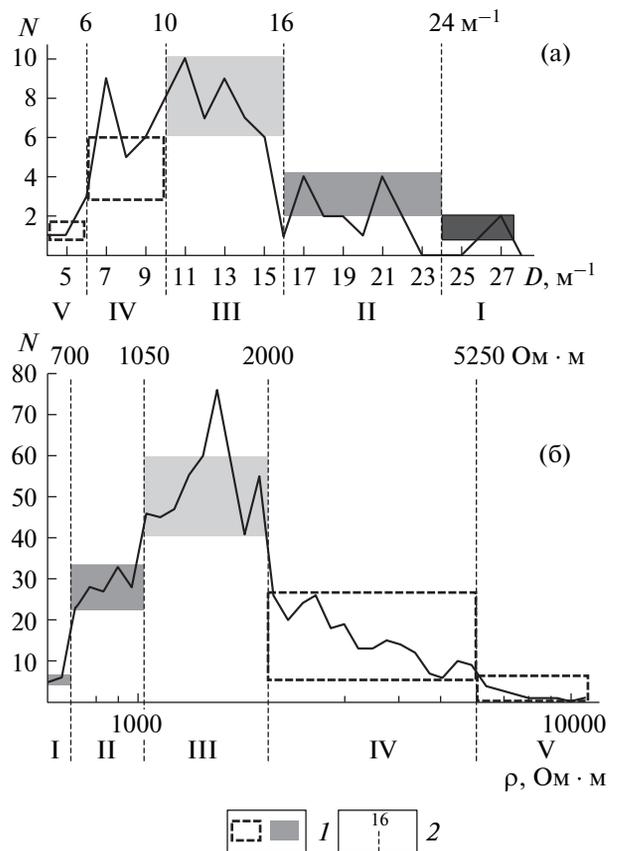
ная зональность закономерным образом проявляется в степени нарушенности массива горных пород, что также отражается в поле распределения УЭС.

Цель исследования заключалась в разработке основ тектонофизического подхода к интерпретации материалов малоуглубинной ЭТ, полученных в ходе изучения внутренней структуры активных разломных зон на юге Восточной Сибири. Объекты исследования – более трех десятков разломов – расположены на территории Байкальского рифта и смежных, менее активных, регионов Предбайкалья и Забайкалья. Большая часть дизъюнктивов находится в Приольхонье (Зап. Прибайкалье) и, участвуя в строении бортов рифтовых впадин, относится к крутопадающим разрывам различного ранга.

Участки для проведения ЭТ практически не содержали рыхлых наносов и выбирались таким образом, чтобы получить наиболее полную информацию о строении разлома. В большинстве случаев такой информацией были измерения плотности трещин на погонный или квадратный метр, а также строение разломных сместителей и другие геолого-структурные особенности выхода коренных пород. Иногда по форме уступа в рельефе земной поверхности определялось лишь положение главного сместителя, над которым располагался профиль ЭТ.

Для ЭТ применялась многоэлектродная станция “Скала-48” [7]. Методика определения УЭС была отработана и опробована на различных объектах Приольхонья [9]. При измерениях использовали последовательность подключения электродов, соответствующую симметричной установке Шлюмберге с расстоянием между электродами от 1 до 5 м. Инверсия данных ЭТ производилась с применением программного обеспечения Res2DInv [8]. Материалом для интерпретации послужили геолого-структурные измерения и данные по 61 геологическому разрезу общей протяженностью примерно 28 км.

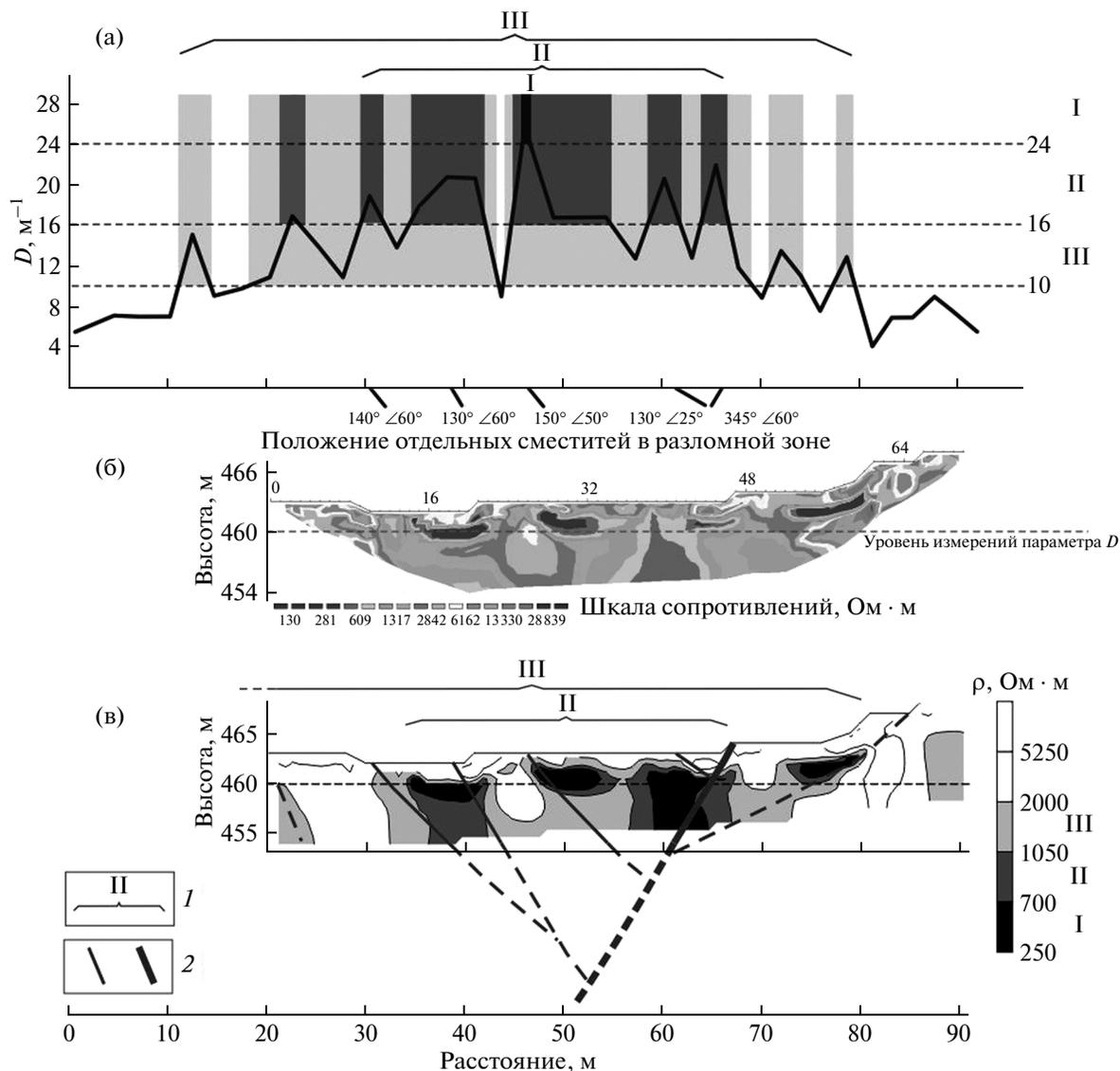
Согласно геолого-структурным наблюдениям разломные зоны, нарушающие древние метаморфические комплексы Приольхонья, выделяются по сгущению трещин и разрывов со смещениями. Статистический анализ параметра плотности трещин  $D$  показал, что у него есть пять уровней (I–V на рис. 1а). В пределах каждого из них замеры плотности трещин встречаются с примерно одинаковой частотой. Один из уровней (III) характеризуется максимальной частотой встречаемости, а четыре других образуют симметричные пары на каждой из нисходящих ветвей в целом нормального распределения параметра  $D$ . При этом блоки пород, соответствующие уровню V, в пределах геодинамически активной территории Приольхонья имеют минимальное распространение и являются небольшими прочными включениями



**Рис. 1.** Гистограммы распределения плотности трещин  $D$  (а) и УЭС  $\rho$  (б) в разломной зоне на мысе Онтхой в Западном Прибайкалье: 1 – участки графиков с сериями близких по частоте встречаемости ( $N$ ) значений  $D$  или  $\rho$ ; 2 – границы участков, соответствующих пяти (I–V) состояниям нарушенности породного массива, которые закономерно различаются пределами изменений параметров  $D$  и  $\rho$  вследствие постадийного формирования разломной зоны.

(гранит-аплиты, мигматитовые прослои и др.) с редкой сетью видимых трещин. Установлено, что в региональном масштабе приподнятые в рельефе (более прочные) участки Приольхонья характеризуются примерно одинаковыми пограничными величинами  $D$  – 6, 10, 16 и 24 трещины на погонный метр (рис. 1а). На пониженных (менее прочных) участках аналогичные пределы несколько меньше.

В распределении УЭС на участках разломных зон в Приольхонье, так же как и для плотности трещин, выделяется пять уровней (I–V) (рис. 1б). В зонах разломов Предбайкалья и Забайкалья результаты аналогичного анализа из-за региональной специфики различались в количественном выражении (границы уровней), но были аналогичны в качественном отношении (наличие пяти уровней). Пространственно участкам с повышенной плотностью трещин в коренных породах соответствуют области пониженных значений УЭС. Эта закономерность показана на примере разлом-



**Рис. 2.** Результаты применения тектонофизического подхода к обработке геолого-структурных и ЭТ-данных, полученных для профиля, пересекающего разломную зону мыса Онтхой в Приольхонье (Зап. Прибайкалье). а: вариации плотности трещин в 1 погонном метре ( $D$ ); на графике оттенками серого цвета выделены участки, для которых степень нарушения пород трещинами превышает три выделенных статистическим способом (рис. 1а) предела параметра  $D$  (штриховые линии); под графиком – положение и элементы залегания составляющих зону разломных сместителей. б, в: геоэлектрические разрезы, построенные по данным ЭТ вдоль профиля над береговым обрывом м. Онтхой со стандартным набором изолиний (б), а также с изолиниями, проведенными по значениям  $\rho$  (в), выделенным при статистической обработке массива данных (рис. 1б); 1 – генерализованные границы разломной зоны (III) и участков в ее пределах, характеризующихся примерно одинаковой степенью нарушения субстрата (II, I) согласно результатам анализа распределений  $D$  и  $\rho$ ; 2 – второстепенные и главный сместители разломной зоны (штриховые линии – предполагаемое положение).

ной зоны мыса Онтхой в Приольхонье (рис. 2), для которой ранее были представлены гистограммы распределения параметров  $D$  и  $\rho$  (рис. 1).

В строении м. Онтхой принимают участие граниты и гранито-гнейсы, которые нарушены докембрийским разломом, выполненным милонитами. Он стал концентратором напряжений в более позднее время, что привело к возобновлению подвижек с формированием разломной зоны “хрупкого типа”. Последняя представлена участком интенсивно трещиноватых и выветрелых по-

род, в пределах которого обособляются главный и несколько второстепенных сместителей сбросового типа, проявляющихся в виде зон интенсивно передробленных пород. Вкрест простирания этой зоны выполнены электрические зондирования ЭТ (рис. 2б) и геолого-структурные наблюдения, включая замеры плотности трещин (рис. 2а).

Анализ структурных данных показал (рис. 2а), что один из сместителей разломной зоны ассоциируется с первым уровнем нарушения (I), а

другие – со вторым (II), не имеющим сплошного распространения на профиле. Уровень III также характеризуется дискретностью проявления и соответствует участкам массива с густой сетью трещин, из которых отдельные крупные представители могут иметь небольшие смещения или следы скольжения на поверхностях. Участки с низкой степенью нарушенности ( $<10 \text{ м}^{-1}$  – трещин на погонный метр) располагаются в краевых частях профиля. Для выявления главной закономерности строения разломной зоны проведена генерализация степени нарушенности ее субстрата на основе единообразного подхода к анализу распределения каждого из пограничных значений параметра  $D$  (10, 16 и  $24 \text{ м}^{-1}$ ) на рис. 2а. Так, к уровням II и III, кроме участков с  $D \geq 16 \text{ м}^{-1}$  и  $D \geq 10 \text{ м}^{-1}$ , были отнесены небольшие промежуточные отрезки профиля со значениями плотности трещин, меньшими  $16 \text{ м}^{-1}$  (для II) и  $10 \text{ м}^{-1}$  (для III). Основанием для этого явилось то, что их размеры были меньше одного или обоих из располагающихся рядом смежных участков профиля с  $D \geq 16 \text{ м}^{-1}$  для уровня II и  $D \geq 10 \text{ м}^{-1}$  для уровня III. Результат генерализации показан фигурными скобками в верхней части рис. 2а и отражает поперечную зональность разломной зоны, прошедшей все три (I–III) стадии развития.

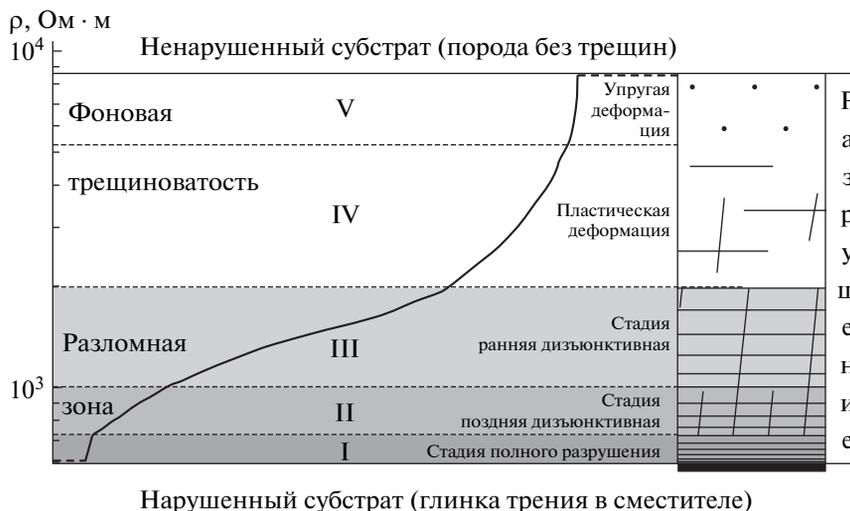
Геоэлектрический разрез разломной зоны мыса Онтхой (рис. 2б) характеризуется широким диапазоном изменения УЭС – от первых сотен до первых десятков тысяч  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ , что обусловлено разной степенью нарушенности субстрата и разной влажностью пород. Самая верхняя часть разреза (глубина до 1.5–2 м) представляет зону аэрации и на момент исследований находилась в маловлажном состоянии с соответствующими ему повышенными и высокими значениями  $\rho$  (2000–10000  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ). УЭС нижней части разреза, определяющееся в целом объемной влажностью породы, закономерно уменьшается с увеличением плотности трещин, т.е. в ряду участков, отвечающих за раннюю (III), позднюю (II) и заключительную (I) стадии развития разлома.

Зональная структура разломной зоны наглядно представлена на рис. 2в, где изолинии проведены по значениям  $\rho$ , являющимся границами уровней I–III. У поверхности такая картина распределения УЭС настолько соответствует закартированному строению разломной зоны (рис. 2а), 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 объему подзон II и III. Для подзоны I дополнительно к участку, выявленному по параметру  $D$ , на геоэлектрическом разрезе выделяются еще три области с аналогичной степе-

ню нарушенности субстрата. Пространственно они ассоциируются с отдельными разрывами, составляющими характерный профиль строения сбросовой зоны (рис. 2в). Причем, если сравнивать участки по размерам, главным следует считать сместитель с элементами залегания  $345^\circ \angle 60^\circ$ . Таким образом, на примере участка “Онтхой” продемонстрированы преимущества метода ЭТ, который в рамках нового подхода к интерпретации результатов позволяет получать исключительные по информативности данные о структуре разломных зон у земной поверхности.

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 позволяют отразить вариации УЭС в нарушенном массиве горных пород в виде обобщенной диаграммы (рис. 3). Ее основу составляет кривая, построенная по тому же массиву данных, что и распределение на рис. 1б, но являющаяся более наглядной для отражения стадий нарушенности массива горных пород. График представляет собой результат объединения точек, отвечающих за отдельный замер  $\rho$  и расположенных в порядке возрастания этого параметра. Верхний и нижний отрезки кривой, показанные штриховыми линиями из-за фиксирования на единичных профилях, являются уровнями, отделяющими практически ненарушенный (порода без трещин с  $\rho$  в десятки и сотни тысяч  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ) и полностью нарушенный (глинка трения в сместителе с  $\rho = 3\text{--}30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ) субстрат от основной области диаграммы, отражающей существование разных стадий разрушения горного массива.

Значения УЭС на участках V и IV относятся к фону и представляют соответственно области упругой и пластической деформаций. Для них характерно существенное (до первых тысяч  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ) 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 для участка III, согласно представлениям тектонофизики, соответствуют разломной зоне, так как отражают степень нарушенности массива на ранней стадии ее формирования. Данный уровень нарушенности пород в геодинамически активных регионах из-за наложения разновозрастных этапов деформации наиболее распространен (соответствующий отрезок кривой – пологий). В совокупности с отсутствием крупных разрывных смещений на участках соответствующего типа это объясняет обычно принимаемое геологами решение об их отнесении к фону. Величины  $\rho$ , соответствующие



**Рис. 3.** Обобщенная диаграмма распределения значений  $\rho$  в порядке их возрастания, отражающая наличие пяти (I–V) состояний нарушенности породного массива (упрощенный вид разрывных сетей — справа), которые имеют место в пределах близповерхностного участка земной коры с разломной зоной, прошедшей все стадии формирования. График  $\rho$  (слева) построен по данным рис. 1б.

щие участку II, менее распространены в массиве, так как отражают нарушенность пород на поздней стадии ее развития, когда произошла локализация деформации. Это проявляется в увеличении плотности трещин и образовании крупных сместителей с “рыхлыми” тектонитами. Низкие значения УЭС на участке I обусловлены субстратом, насыщенным низкоомными продуктами дробления, образующимися при перемещениях по крупным разрывам оперения и главному сместителю на стадии полного разрушения.

Представленная диаграмма составляет теоретическую основу тектонофизического подхода к интерпретации данных ЭТ в геодинамически активных регионах. Его практическая реализация в достаточной степени формализована и состоит в построении и анализе гистограммы распределения параметра  $\rho$  (рис. 1б) с выделением пяти уровней нарушенности субстрата, а также в определении соответствующих им участков породного массива на геоэлектрическом разрезе (рис. 2в). Затем выполняется генерализация с выделением границ разломной зоны и ее наиболее нарушенных фрагментов, сформировавшихся на поздней и заключительной стадиях разломообразования. Развитие подхода состоит в определении количественных соотношений между параметрами  $\rho$  и  $D$  для каждого из уровней, что позволит существенно повысить его эффективность при решении прикладных задач. Для этого необходим опыт исследований в разнотипных природных обстановках, где такие соотношения будут различны, а картина связанного с разломами распределения параметра  $\rho$  может быть осложнена влиянием факторов нетектонического происхождения (наличие чехла рыхлых отложений, продуктов вы-

ветривания, участков оруденения, обводнения, промерзания пород и пр.).

Авторы благодарны коллегам по лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН А.В. Черемных, А.А. Боброву, Ю.П. Бурзуновой и А.С. Черемных за помощь в сборе и обработке полевого материала, а также акад. М.И. Эпову за ценные советы и замечания, высказанные в ходе подготовки статьи к печати.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.* // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. B11307. doi:10.1029/2010JB000871.
2. *Kuria Z.N., Woldai T., van der Meer F.D., Barongo J.O.* // J. Afr. Earth Sci. 2010. V. 57. P. 345–359.
3. *Schutze C., Vienken T., Werban U., Dietrich P., Finizola A., Leven C.* // J. Appl. Geophys. 2012. V. 82. P. 129–136.
4. *Carbonel D., Gutiérrez F., Linares R., Roqué C., Zarroca M., McCalpin J., Guerrero J., Rodríguez V.* // Geomorphology. 2013. V. 189. № 1. P. 93–108.
5. *Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 244 с.
6. *Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П.* // ДАН. 2005. Т. 404. № 4. С. 514–517.
7. Многоэлектродная электроразведочная станция “Скала-48” для работы методом сопротивлений и вызванной поляризации. Руководство пользователя. Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2010. 46 с.
8. *Loke M.H.* Tutorial. RES2DINV Vers. 3.59, Rapid 2-D Resistivity & IP Inversion Using the Least-squares Method. Malaysia: Geotomo Software, 2010. 148 p.
9. *Запунов Р.М.* В кн.: Трофимукские чтения — 2013. Новосибирск: ИНГГ, 2013. С. 271–274.