

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.34+550.3+551.243

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-3(3-12)

**ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ И РАДОНОВАЯ СЪЕМКА
КИМБЕРЛИТОВМЕЩАЮЩИХ РАЗЛОМНЫХ ЗОН АЛАКИТ-МАРХИНСКОГО
ПОЛЯ В ЗАПАДНОЙ ЯКУТИИ: ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ**

К.Ж. Семинский¹, А.А. Бобров¹, В.В. Оленченко²

¹Институт земной коры СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия; seminsky@crust.irk.ru

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

Представлен опыт применения комплекса малоглубинных геофизических методов (электротомография и радоновая съемка) для выявления разломных зон в платформенном чехле Алаakit-Мархинского кимберлитового поля в Западной Якутии. Исследования проводились на участках локализации Файнштейновского и Байтахского кимберлитовых тел в летнее время. Пройдено шесть профилей, два из которых на участках располагались над трубкой, а третий – за пределами надтрубочного пространства. Методы дополняют друг друга и, несмотря на сложные условия реализации (высокое содержание почвенной влаги, наличие многолетней мерзлоты и др.), позволяют выделять разломные зоны, строение которых в верхней части платформенного чехла относится к ранней стадии разломообразования. Кимберлитовмещающей зоне соответствует прерывистая по форме аномалия почвенного радона, а на геоэлектрическом разрезе – субвертикальный участок повышенной проводимости. Совместный анализ аномальных участков неоднородного строения позволяет определять положение отдельных разрывов второго порядка, сгущающихся в разломной зоне.

Разломная зона, электротомография, радон, многолетнемерзлая порода, кимберлитовое поле

**ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY AND RADON SURVEY
OF KIMBERLITE-CONTAINING FAULT ZONES ON ALAKIT-MARKHINSKY FIELD
IN WESTERN YAKUTIA: PRACTICAL EXPERIENCE**

K.Zh. Seminsky¹, A.A. Bobrov¹, V.V. Olenchenko²

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, 128, Lermontova str.,
Irkutsk, 664033, Russia; seminsky@crust.irk.ru

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS,
3, Acad. Koptuga ave., Novosibirsk, 630090, Russia; OlenchenkoVV@ipgg.sbras.ru

The experience of application of a complex of near-surface geophysical methods (electrical resistivity tomography and soil-radon survey) for identification of fault zones in the platform cover of the Alakit-Markhinsky kimberlite field in Western Yakutia is presented. Surveys were carried out in summertime on the sites of Faynshteynovsky and Baytakhsy kimberlite bodies. In total, six profiles were passed: on each site, two profiles made over the kimberlite pipe, and the third one beyond the pipe boundaries. The methods applied have been shown to supplement each other and, despite the severe conditions of realization (high moisture content in a soil layer, existence of permafrost, etc.), allow fault zones to be identified. The structure of the fault zones in the top part of the platform cover corresponds to the early stage of fault formation. The soil radon anomaly of a faltering character and the subvertical anomaly of increased conductivity in the geoelectric cross-section correspond to the kimberlite containing zone. The discontinuous character of both anomalies analyzed jointly allows to allocate distinct fractures of the 2nd order, which are concentrated in the fault zone.

Fault zone, electrical resistivity tomography, radon, permafrost rock, kimberlite field

ВВЕДЕНИЕ

Выявление разломных зон и картирование особенностей их строения имеют принципиальное значение для изучения платформенных районов

развития кимберлитового магматизма, поскольку многие специалисты считают структурный фактор определяющим в размещении алмазоносных

тел [Мокшанцев и др., 1974; Брахфогель, 1984; Лелюх и др., 1989; Ваганов, 2000]. Подобные работы осложняются двумя особенностями выделения элементов разломной тектоники. Во-первых, в пределах платформ из-за слабой обнаженности пород малоэффективны прямые геолого-структурные наблюдения. Во-вторых, в верхней части осадочного чехла разломы проявлены в виде сложных для картирования форм (зоны повышенной трещиноватости, зоны скрытых разломов фундамента и др.), которые соответствуют ранней стадии разломообразования [Семинский, 2003, 2014].

В этих условиях на первый план выступают геофизические методы, позволяющие определить главные признаки нарушения пород верхней части разреза. Из малоглубинных методов, используемых для выявления разломов в тектонически активных регионах [Putiska et al., 2012; Schütze et al., 2012; Zarroca et al., 2012], при изучении структуры платформенного чехла перспективен геофизический комплекс, включающий радоновую съемку и электротомографию, которая представляет современную модификацию метода вертикальных электрических зондирований. Зоны трещиноватости даже при отсутствии крупных

сместителей контролируют миграцию подземных вод и газов. Как следствие, они должны фиксироваться на геоэлектрических разрезах и профилях газовой съемки в виде участков пониженного удельного электрического сопротивления (УЭС) ρ и повышенной объемной активности радона Q . Их неоднородное строение, определяющееся неравномерной нарушенностью субстрата разломных зон, может получить специфическое отражение в многолетнемерзлых породах, повсеместно распространенных в алмазоносных регионах России.

Цель статьи – рассмотреть закономерности проявления кимберлитовмещающих разломов в полях почвенного радона и удельного электрического сопротивления, зафиксированных методами эманационной съемки и электротомографии в области распространения многолетнемерзлых пород на территории Западной Якутии. Задачи: 1) установить особенности распределения ρ и Q в приповерхностной части мерзлых толщ Алаakit-Мархинского кимберлитового поля на основе данных электротомографии и радоновой съемки, проведенных в пределах участков локализации двух трубок взрыва; 2) создать для этих участков геолого-геофизические модели строения надтрубочной толщи и на их основе представить главные признаки проявления разломов в распределениях параметров Q и ρ , характерные для геологических и ландшафтно-климатических условий Западной Якутии.

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Малоглубинные геофизические исследования проводились на участках локализации двух кимберлитовых трубок – Файнштейновской и Байтахской. Они принадлежат к Алаakit-Мархинскому полю (рис. 1), в пределах которого детально изученные алмазоносные тела контролируются разломами [Брахфогель, 1984; Лелюх и др., 1989; Харьков и др., 1998]. Выявление закономерностей разломного строения надтрубочного пространства для данной территории имеет прикладное значение, так как перспективы открытия месторождений алмазов связываются с объектами, находящимися под толщей траппов и осадков перми и карбона общей мощностью 50–100 м.

Геология кимберлитового поля представлена на примере схематичных разрезов, пересекающих трубки Файнштейновская и Байтахская (рис. 2). Платформенный чехол включает терригенно-карбонатные и терригенные породы, относящиеся к нижнему и верхнему палеозою соответственно. Они прорваны траппами, основной объем которых в виде долеритовых силлов сосредоточен в горизонтально залегающих породах пермокарбона. По-

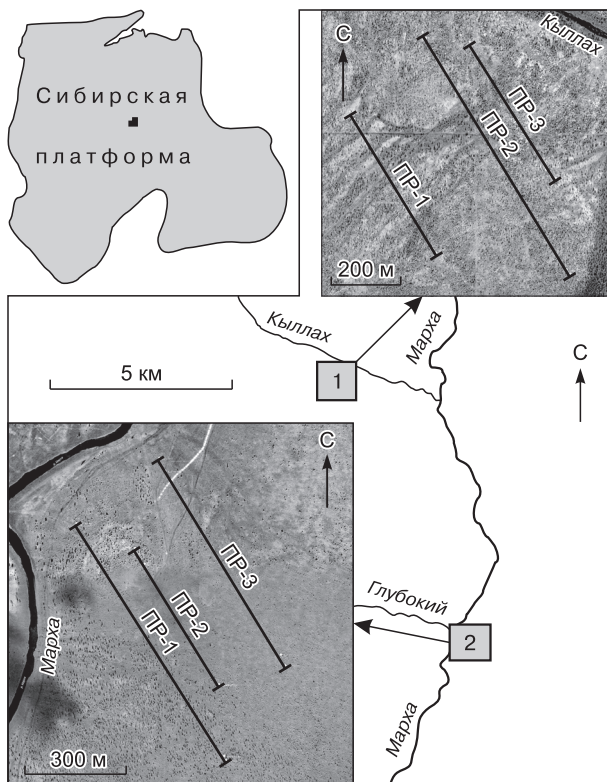


Рис. 1. Схемы геофизических профилей на участках Файнштейновский (1) и Байтахский (2), расположенных в пределах Алаakit-Мархинского кимберлитового поля (Западная Якутия).

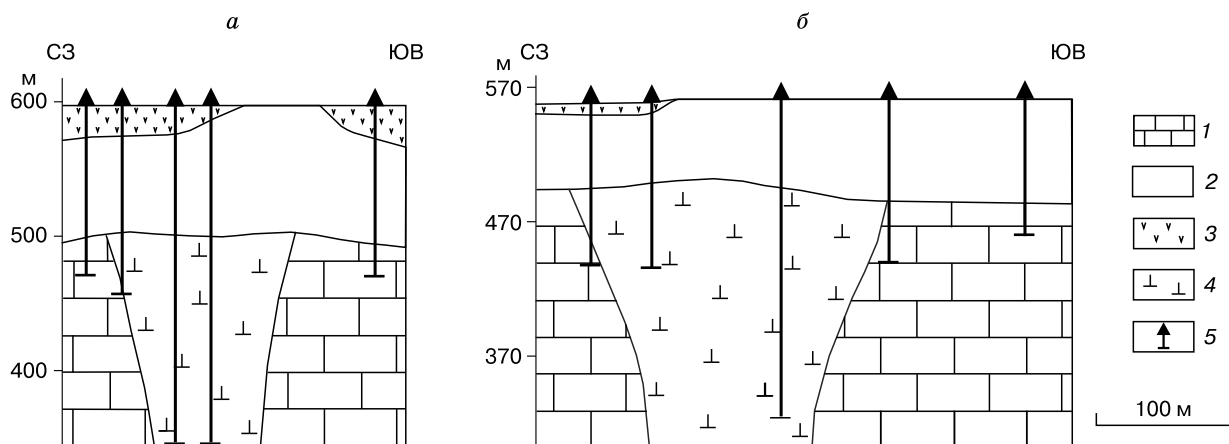


Рис. 2. Схематичные геологические разрезы кимберлитовых трубок Файнштейновская (а) и Байтахская (б) [Коробков и др., 2013].

1 – терригенно-карбонатные отложения нижнего палеозоя; 2 – нерасчлененные терригенные отложения перми и карбона; 3 – интрузии долеритов; 4 – кимберлитовые тела; 5 – скважины.

скольку кимберлитовый магматизм в рассматриваемом районе проявился главным образом в среднем палеозое [Брахфогель, 1984; Ваганов, 2000], терригенно-карбонатные породы по отношению к трубкам являются вмещающими, а траппы и отложения пермокарбона – перекрывающими.

Для интерпретации материалов электротомографии и радоновой съемки важное значение имеют сведения об электрических и радиоактивных свойствах перечисленных типов пород. Согласно [Сараев и др., 2010], УЭС долеритов изменяется в пределах 1000–20 000 Ом·м, вмещающих пород – 150–7000 Ом·м, перекрывающих отложений – 20–400 Ом·м, кимберлитов – 10–400 Ом·м. Содержание урана в некоторых разновидностях кимберлитов повышено [Уханов и др., 1982], но для алмазонасных пород Алакит-Мархинского поля аномальная радиоактивность не установлена.

Регион исследований относится к области сплошного развития многолетней мерзлоты [Ершов, 2002]. Ее сезонная динамика вносит определенную специфику в анализ геофизических материалов, что, с одной стороны, осложняет интерпретацию, а с другой – упрощает ее. Как известно, газовые эманаии затруднены в мерзлой породе, но усиливаются при оттаивании. Электропроводность мерзлой толщ зависит от степени льдистости (влажности), минерализации поровой влаги и температуры [Фролов, 1998], что осложняет интерпретацию данных электроразведки. В то же время существуют крайние состояния в виде низкоомных таликов и высокоомных прослоев льда, которые могут использоваться в качестве геоэлектрических маркеров. Таким образом, в поле распределения параметров Q и ρ массивная мерзлая толща является благоприятным фоном. На

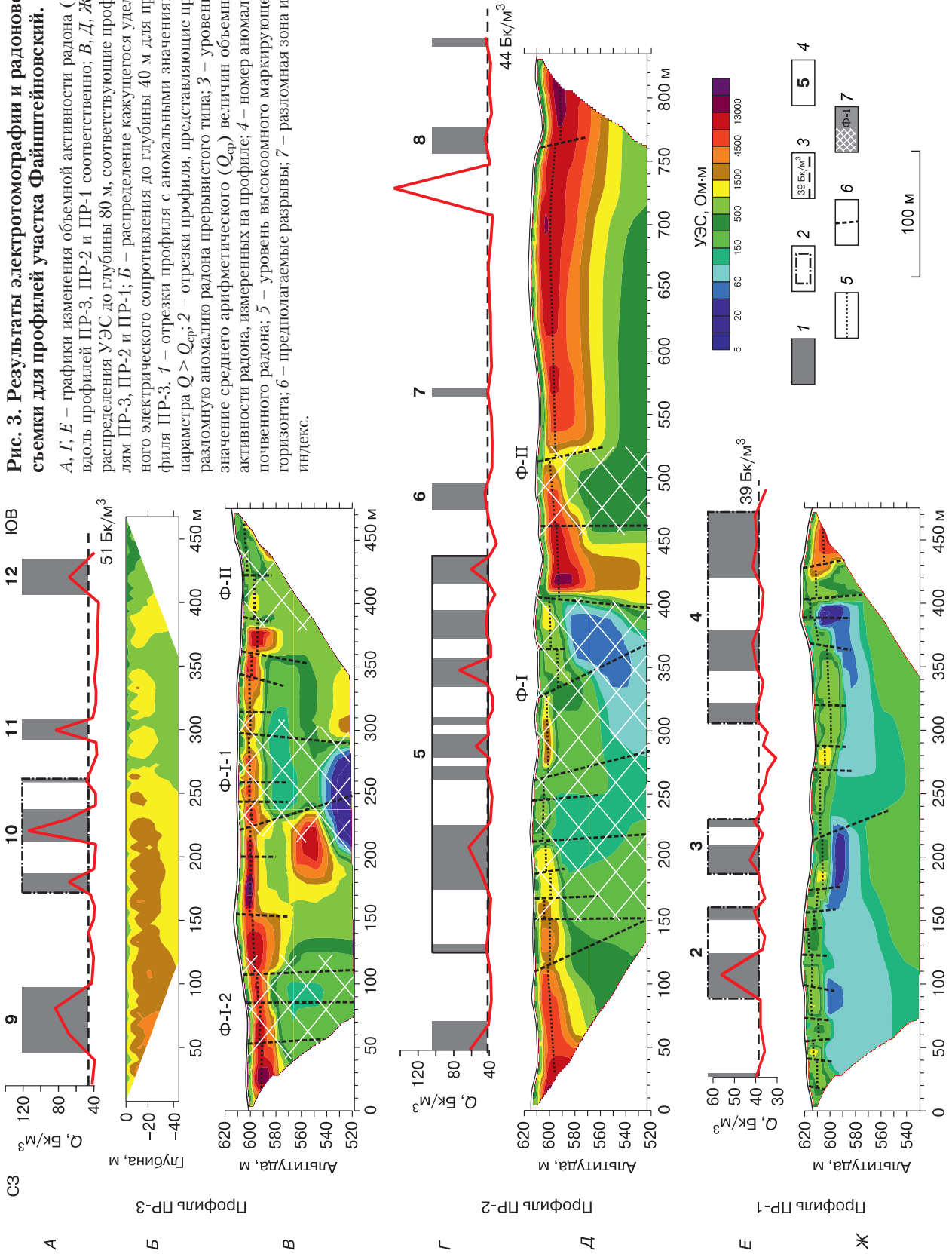
нем разломные зоны должны выделяться аномалиями ввиду их повышенной нарушенности и проницаемости для газов и водных растворов. В районе исследований на глубинах до 80 м межмерзлотные воды отсутствуют, и флюидизация разломных зон может проявляться главным образом в пределах подрусловых таликов [Алексеев, 2009].

Радоновая съемка и электротомография на участках Файнштейновский и Байтахский были реализованы в пределах шести профилей, два из которых на каждом из участков располагались над трубкой, а третий – за ее пределами (см. рис. 1). Простирание профилей – северо-западное, вкрест кимберлитовмещающим разломам региона [Брахфогель, 1984; Лелюх и др., 1989]. Тела кимберлитов залегают под центральными частями надтрубочных профилей на глубинах 100 м (трубка Файнштейновская) и 60 м (трубка Байтахская) (см. рис. 2). Это предполагает проявление кимберлитовмещающих разломов на геоэлектрических разрезах и графиках вариаций Q , соответствующих профилям ПР-2, ПР-3 на участке Файнштейновский и профилям ПР-1, ПР-2 на участке Байтахский.

Методика эманаионной съемки [Бобров, Черемных, 2014; Seminsky, Demberel, 2013] позволяет определять среднюю за двое суток абсолютную величину Q в пункте опробования. Чувствительность использованного для измерений оборудования “Камера-01” находится в диапазоне 0.27 ± 0.03 (Бк·с)⁻¹, а относительная погрешность составляет ± 30 %. Пункты опробования располагались на расстоянии 10 м друг от друга в центральной и 20 м – в краевых частях каждого профиля. Графики вариаций Q вдоль профилей

Рис. 3. Результаты электротомографии и радоновой съемки для профилей участка Файнштейновский.

А, Г, Е – графики изменения объемной активности района (Q) вдоль профилей ПР-3, ПР-2 и ПР-1 соответственно; *В, Д, Ж* – распределения УЭС до глубины 80 м, соответствующие профилям ПР-3, ПР-2 и ПР-1; *Б* – распределение кажущегося удельного электрического сопротивления до глубины 40 м для профиля ПР-3; *1* – отрезки профиля с аномальными значениями параметра $Q > Q_{ср}$; *2* – отрезки профиля, представляющие приращенное аномалию района прерывистого типа; *3* – уровень и разломную аномалию района прерывистого типа; *4* – номер аномалии активности района, измеренных на профиле; *5* – уровень высокоомного маркирующего горизонта; *6* – предполагаемые разрывы; *7* – разломная зона и ее индекс.



(рис. 3, А, Г, Е) обрабатывались в соответствии с опытом исследований радоновой активности разломов Прибайкалья и Монголии [Семинский, Бобров, 2009; Seminsky, Demberel, 2013]. Аномальными считались значения Q , превышающие среднее арифметическое ($Q_{ср}$) величин, полученных по всему профилю. Кроме того, в единую аномалию (прерывистого типа) объединялись отрезки профиля с $Q > Q_{ср}$, если их размеры превышали соседний отрезок с $Q < Q_{ср}$ (см. рис. 3, аномалии № 2–5, 10). Существование в пределах разломных зон таких слабопроницаемых участков обусловлено наличием тонкодисперсного заполнителя (например, глина трения) или узких блоков, почти не нарушенных разрывами [King et al., 1993; Seminsky, Demberel, 2013].

Физические основы, методика измерений и обработки данных электротомографии подробно описаны в [Loke, 2009]. При измерениях применялась многоэлектродная электроразведочная станция “Скала-48” [Балков и др., 2012]. Расстояние между электродами составляло 5 м, а последовательность их подключения соответствовала установке Шлюмберже (зондирование до глубины 40 м, см. рис. 3, Б) и встречной трехэлектродной дипольной установке (глубинность 80 м, см. рис. 3, В, Д, Ж). Решение обратной задачи и построение геоэлектрических разрезов производились с применением программного обеспечения Res2DInv. Использовался метод робастной инверсии с ограничением значений сопротивлений модели [Loke, 2010]. Ограничение способствует созданию модели с почти постоянными значениями сопротивлений в пределах отдельных областей и контрастными границами между ними, что важно при изучении разломной структуры.

Закономерности распределения значений ρ и Q в приповерхностной части мерзлых слоистых толщ Алакит-Мархинского поля

Результаты радоновой съемки. На участке Файнштейновский поле радона отличается слабой интенсивностью (см. рис. 3, А, Г, Е). Если не рассматривать выделяющееся из общего ряда значение 150 Бк/м³ (см. рис. 3, Г), параметр Q меняется в небольших пределах (42–117 Бк/м³). Низкий уровень эксхалляции объясняется насыщением в летний период приповерхностной части разреза (сезонноталого слоя) избыточной влагой, препятствующей выходу газа к поверхности. Пространственное распределение объемной активности радона характеризуется неравномерностью, проявляющейся в чередовании отрезков профилей с максимальными и минимальными значениями Q .

На трех эманационных профилях участка Файнштейновский выделено 11 аномалий радона, отличающихся интенсивностью и протяженностью по профилю (см. рис. 3, А, Г, Е). Самые

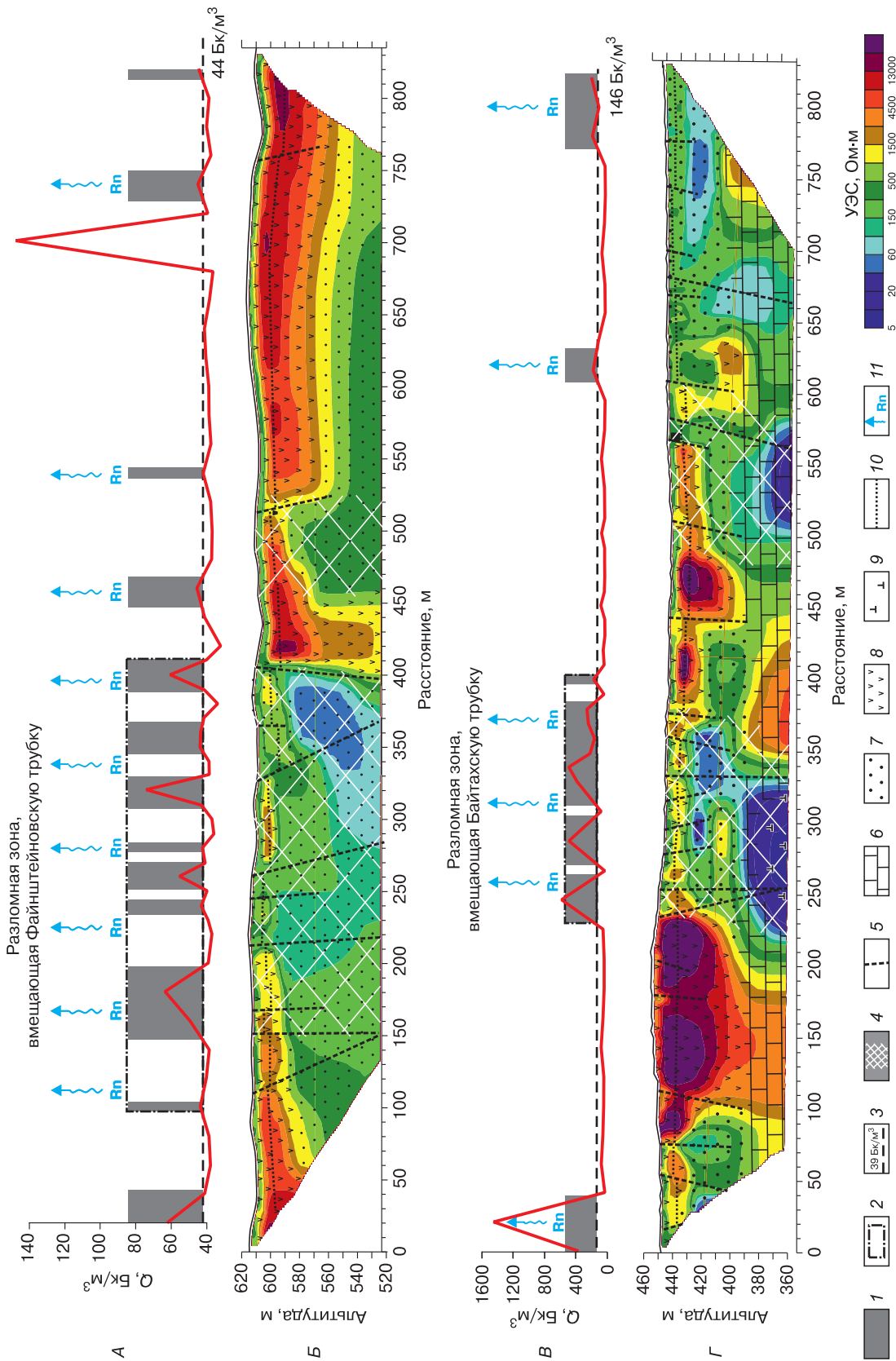
интенсивные из них – № 5 (75 Бк/м³), № 9 (85 Бк/м³), № 11 (88 Бк/м³) и № 10 (117 Бк/м³) – превышают значение $Q_{ср}$ в 2 раза. Они зафиксированы в пределах надтрубочных пересечений ПР-2 и ПР-3, сближены в пространстве и трассируются по положению отдельных максимумов Q на соседних профилях. Следовательно, в поле эманацій радона отражается неоднородное по степени нарушения и проницаемости строение зоны кимберлитовмещающего разлома.

Участок Байтахский характеризуется анологичными закономерностями распределения параметра Q , но существенно большими концентрациями радона. По-видимому, это обусловлено меньшей обводненностью почвенного слоя (см. рис. 4, В). Интенсивность широкой (150–200 м) аномалии, связанной с кимберлитовмещающей разломной зоной, на одном из профилей равна 585 Бк/м³, а на другом достигает 2380 Бк/м³.

Таким образом, первые результаты эманационной съемки на двух участках Алакит-Мархинского поля показали, что признаком разломной зоны является наличие широкой аномалии радона, интенсивность которой более чем в 2 раза превышает $Q_{ср}$ на участке измерения. Аномалии имеют прерывистую форму, которая обусловлена неоднородным строением зоны, отвечающим ранней стадии развития дизъюнктивной структуры в осадочном чехле. Это создает неоднозначность в интерпретации данных радоновой съемки, которая в подобных случаях должна использоваться в комплексе с другими методами картирования разломов, например электротомографией.

Результаты электротомографии. Распределения УЭС, полученные для участка Файнштейновский (см. рис. 3, В, Д, Ж), позволяют выделить три субгоризонтальных геоэлектрических слоя. Эта главная особенность геоэлектрического разреза отчетливо видна и на распределении кажущегося электрического сопротивления, приведенного в качестве примера для профиля ПР-3 (см. рис. 3, Б). Верхний слой характеризуется мощностью ~2 м и низкими УЭС (первые десятки – первые сотни ом-метров). Второй слой имеет мощность 5–25 м и вследствие высоких УЭС (первые сотни – первые десятки тысяч ом-метров) является маркирующим. Третий слой, несмотря на наличие локальных максимумов УЭС (10 000 Ом-м и более), в целом характеризуется сравнительно высокой электропроводностью и прослеживается до основания разреза.

Слоистая структура поля УЭС на участке Файнштейновский нарушена низкоомными субвертикальными неоднородностями, которые по размеру можно разделить на два порядка. К неоднородностям 1-го порядка относятся широкие области пониженных УЭС, отмеченные на разрезах



ПР-3 и ПР-2 белой сеткой (см. рис. 3, В, Д). В их пределах верхнему и нижнему геоэлектрическому слоям соответствуют интенсивные минимумы ρ , а высокоомный маркирующий горизонт сужается до 5 м и менее, вплоть до исчезновения на локальных отрезках. Описанные сужения слоя 2 являются признаком для выделения неоднородностей 2-го порядка. Они прослеживаются по отрицательным аномалиям ρ нижнего слоя и (или) трассируются по линейаризованным сгущениям изолиний УЭС. На рис. 3 эти структуры показаны пунктирными линиями внутри неоднородностей 1-го порядка, а также в тех частях разрезов, где имеются подобные признаки для их выделения.

Характер проявления субвертикальных неоднородностей отличается для профиля ПР-1 (см. рис. 3, Ж) в сравнении с надтрубочными разрезами ПР-2 и ПР-3 (см. рис. 3, В, Д). В его пределах нет крупных неоднородностей, а структуры 2-го порядка не проникают глубоко в слой 3. На разрезах ПР-3 и ПР-2 субвертикальные неоднородности 1-го порядка являются зонами сгущения структур 2-го порядка, многие из которых нарушают всю толщу и трассируются от одного профиля к другому (см. рис. 3, В, Д). В проявлении неоднородностей 1-го порядка надтрубочные разрезы также подобны. На обоих пересечениях проявляется небольшая зона повышенной проводимости Ф-II. Крупная неоднородность Ф-I в пределах профиля ПР-2 делится высокоомным блоком на два сегмента, причем каждый из них трассируется на профиль ПР-3 в виде обособленных зон (Ф-I-1, Ф-I-2).

Следовательно, система низкоомных неоднородностей в толще пород над трубкой Файнштейновской, по-видимому, является связанной. Аналогичный вывод был сделан по материалам электротомографии участка Байтахский, который показан здесь одним надтрубочным разрезом ПР-1 (см. рис. 4, Г). Субвертикальные низкоомные неоднородности представлены двумя крупными зонами, включающими структуры 2-го порядка. Они нарушают три верхних геоэлектрических горизонта, а также четвертый слой, который выделяется на данном участке у основания разреза в виде высокоомных фрагментов (интервалы 50–200, 340–470, 720–780 м).

В целом электротомография верхней части геологического разреза отразила его четырехслойное строение, которое над изученными кимберлитовыми телами осложнено системой субвертикальных проводящих неоднородностей. Ниже представлена интерпретация выявленной структуры на базе сопоставления геоэлектрических разрезов с данными радоновой съемки, а также известными сведениями о геологических и геокриологических особенностях района исследований.

Признаки проявления разломов в распределениях параметров Q и ρ , характерных для геологических и ландшафтно-климатических условий Западной Якутии

Прежде чем перейти к закономерностям проявления кимберлитовмещающих разломов в полях радона и УЭС, необходимо остановиться на особенностях геологического строения участков исследования, выявленных по данным электротомографии. Структура и характер геоэлектрического разреза в регионе обусловлены воздействием вещественного и температурного факторов. Они определяют состав и физическое состояние пород, т. е. создают фон для проявления в поле УЭС изучаемых разломов.

Вещественный фактор предопределил горизонтальную расслоенность геоэлектрических разрезов. Это было установлено при сопоставлении УЭС выделенных слоев с величинами ρ , известными для траппов, а также пород, перекрывающих и вмещающих кимберлиты. На рис. 4, Б, Г (усл. зн. 6–9) приведены результаты геологической интерпретации геоэлектрических разрезов для каждого участка. Видно, что три из четырех геоэлектрических слоев (2–4) соответствуют разным типам пород платформенного чехла.

Терригенные отложения нижнего палеозоя зафиксированы у основания разреза на Байтахском участке в виде фрагментов с УЭС 200–6000 Ом·м (см. рис. 4, Г). Они чередуются с низкоомными частями массива, наиболее крупный из которых (интервал 200–340 м), по-видимому, представлен кимберлитами, так как их кровля по априорным данным находится на глубине 60 м (см. рис. 2, б). На терригенных отложениях залегают породы пермокарбона, характеризующиеся меньшей электропроводностью (УЭС – 10–400 Ом·м). В пределах Файнштейновского участка они представляли нижнюю половину изученного разреза (см. рис. 4, Б). Наиболее высокоомные породы района (с УЭС до первых десятков тысяч ом-метров) – долериты – слагают главным образом второй от поверхности геоэлектрический слой. Вследствие специфики формирования пород данного типа он характеризуется переменной мощностью, причем в раздувах долериты кое-где “замещают” маломощный слой 3 (100–200, 430–490, 600–650 м, см. рис. 4, Г). Отмеченная особенность залегания слоя 2, как и реконструкции геологического разреза в целом (см. рис. 4, Б, Г), не противоречат известным данным о строении платформенного чехла в пределах Алакит-Мархинского поля (см. [Коробков и др., 2013, рис. 2 и др.]).

Температурный фактор должен быть привлечен для интерпретации геоэлектрических разрезов, так как вещественный состав пород не объясняет некоторых важных особенностей распределе-

ния УЭС. Во-первых, это повсеместное существование низкоомного слоя 1, который располагается у поверхности и имеет мощность около 2 м (см. рис. 3, В, Д, Ж; рис. 4, Б, Г). Он представляет собой сезонного оттаивания, находящийся летом в обводненном состоянии. Во-вторых, это наличие в маркирующем слое 2 фрагментов с УЭС ниже 1000 Ом-м (см. рис. 3, Ж; рис. 4, Г, правая часть). Их происхождение, по-видимому, обусловлено высокольдистой (по экзогенной трещиноватости) частью многолетнемерзлой толщи, которая образована физическим выветриванием пород в слое годовых колебаний температуры [Шестернев, 2001; Ершов, 2002]. Согласно [Алексеев, 2009], во многих скважинах Далдыно-Алакитского района горизонт с высокой объемной льдистостью (20–30 %) фиксируется до глубин 15–25 м. В-третьих, температурный фактор является ключевым для интерпретации субвертикальных низкоомных неоднородностей в надтрубочной толще. Утонение маркирующего слоя высокой льдистости в пределах неоднородностей 1-го порядка, а также его сужения (до исчезновения) в пределах неоднородностей 2-го порядка являются признаками частичной деградации мерзлоты (см. рис. 3, В, Д, Ж; рис. 4). В сочетании с высокой электропроводностью это свидетельствует о наличии “компетентных” для тепло- и массопереноса структур, которыми в земной коре, как правило, являются разломы. Этот вывод, сделанный при изучении многолетнемерзлых пород Якутии, согласуется с результатами электротомографии в горах Северного Тянь-Шаня [Северский и др., 2014]. На одном из перевалов разломный узел стал причиной сокращения мощности и частичной деградации 30-метрового слоя мерзлых пород.

Доказательством повышенной проницаемости массива в местах проявления субвертикальных низкоомных неоднородностей в наших исследованиях служат крупные прерывистые или мелкие непрерывные аномалии радона (см. рис. 3, 4). В пределах надтрубочных профилей они обычно располагаются над самим разрывом или фрагментами крыльев, которые входят в зону влияния сместителя, где летом происходит достаточно интенсивный флюидо- и теплообмен. Отсутствие повышенных концентраций радона над некоторыми разрывами объясняется наличием непроницаемого заполнителя в виде глинки трения или льда. Таким образом, поля радона и УЭС отражают разные стороны проявления разноранговых разломных зон в толще мерзлых пород. При этом структурный фактор, наряду с вещественным и температурным, является значимым для формирования особенностей геоэлектрических разрезов на изученных участках.

Применение электротомографии и эманиционной съемки позволило представить строение

верхней части платформенного чехла на Файнштейновском и Байтахском участках в виде геолого-геофизических моделей (см. рис. 4). На базе длинных надтрубочных профилей показаны структурно-вещественные особенности разреза в соответствии с интерпретацией реальных распределений параметров ρ и Q . Согласно моделям, дизъюнктивные структуры Алакит-Мархинского поля могут быть выявлены при совместном анализе материалов радоновой съемки и малоглубинной электротомографии по следующим признакам.

Крупная кимберлитовмещающая разломная зона выделяется широкими и неоднородными аномалиями в распределениях параметров ρ и Q . В поле радона аномалия имеет сложную форму и интенсивность, которая более чем в 2 раза превышает $Q_{ср}$ на участке измерений. На геоэлектрическом разрезе разломной зоне соответствует широкий субвертикальный участок повышенной электропроводности. У поверхности он представлен высокоомным маркирующим горизонтом с серией пережимов, которые отражают положение разрывов 2-го порядка, сгущающихся в разломной зоне. В нижней части аномального участка имеют место крупные сегменты породного массива, УЭС которых вследствие интенсивной нарушенности и флюидизации понижается до единиц ом-метров. Положение отдельного разрыва в разломной зоне определяется по локальному сужению и(или) смещению высокоомного маркирующего горизонта, а ниже его трассируется линейными отрезками изолиний УЭС, сгущающимися на границах участков с разной электропроводностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Малоглубинные геофизические исследования, проведенные для участков локализации Файнштейновской и Байтахской кимберлитовых трубок, впервые показали, что комплексирование методов электротомографии и радоновой съемки, несмотря на сложные ландшафтно-климатические условия Западной Якутии, перспективно для выявления разломов платформенного чехла. Работы должны производиться в летнее время. Этот сезон благоприятен для миграции газов по разрывам, а также для формирования приповерхностного слоя талых пород, обеспечивающего контрастное проявление нижележащего высокоомного горизонта, который служит маркером для выделения дизъюнктивных структур.

Особенности распределений объемной активности почвенного радона Q и удельного электрического сопротивления ρ в приповерхностной части многолетнемерзлой толщи определяются суммарным воздействием вещественного, температурного и структурного факторов. Субгоризонтальное залегание пород платформенного чехла в совокупности с экзогенной трещиноватостью мерзлой

толщи формируют слоистость геоэлектрического разреза и сравнительно однотипные условия для эманаций. Подобный фон благоприятен для проявления разломов, нарушающих слоистость и способствующих выходу газов в атмосферу.

Разломы как субвертикальные зоны повышенного тепло- и массообмена между смежными горизонтами мерзлой толщи отчетливо выделяются участками сравнительно высоких значений Q и низких величин ρ . Аномалии отличаются неоднородностью, отражающей неравномерность строения разломных зон. Она типична для ранних стадий формирования дизъюнктивов и в рассматриваемых условиях осложняется слоистым строением толщи многолетнемерзлых пород.

Разломной зоне, в том числе вмещающей кимберлиты, соответствует прерывистая аномалия почвенного радона, а на геоэлектрическом разрезе – широкий субвертикальный участок повышенной электропроводности. Неоднородность аномалий выражается в существовании фрагментов массива, для которых величина Q более чем в 2 раза превышает фоновые значения, а параметр ρ понижается до десятков и единиц ом-метров. Наиболее контрастно разломная зона проявляется в “деградации” высокоомного маркирующего горизонта, характеризующегося повышенной льдистостью. Это выражается в уменьшении общей мощности горизонта и появлении локальных сужений, которым обычно соответствуют максимальные содержания радона в почве. Так в структуре разломной зоны отражается положение отдельных разрывов, являющихся в мерзлой толще проводниками тепла, флюидов и газов.

Применение указанных признаков для картирования кимберлитовмещающих разломных зон может быть затруднено в пределах Алаakit-Мархинского поля из-за региональных особенностей строения платформенной толщи, физического состояния ее отдельных фрагментов и ландшафтно-климатических условий реализации методов малоглубинной геофизики. Возникающие сложности отчасти преодолимы путем приобретения опыта исследований в разных обстановках.

Авторы благодарны начальнику отдела поисковой геологии АК “АЛРОСА” ЗАО М.И. Лелюху и главному геофизику Амакинской ГРЭ И.Г. Цою, а также сотрудникам лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН кандидатам геол.-мин. наук С.А. Борнякову, А.В. Черемных, инженерам А.С. Черемных, А.В. Шагуну и А.К. Семинскому за организацию и помощь в проведении полевых геофизических работ, активное участие в обсуждении полученных материалов.

Работы выполнены при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-05-00154) и АК “АЛРОСА” ЗАО.

Литература

- Алексеев С.В.** Криогидрогеологические системы Якутской алмазоносной провинции / С.В. Алексеев. Новосибирск, Академ. изд-во “Гео”, 2009, 319 с.
- Балков Е.В., Панин Г.Л., Манштейн Ю.А. и др.** Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // Геофизика, 2012, № 6, с. 54–63.
- Бобров А.А., Черемных А.С.** Тажеранский интрузивный массив в эманационном радоновом поле (Западное Прибайкалье) // Изв. Сиб. отд-ния секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений, 2014, № 2 (45), с. 64–70.
- Брахфогель Ф.Ф.** Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы / Ф.Ф. Брахфогель. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1984, 128 с.
- Ваганов В.И.** Алмазные месторождения России и мира (Основы прогнозирования) / В.И. Ваганов. М., ЗАО “Геоинформмарк”, 2000, 371 с.
- Ершов Э.Д.** Общая геокриология / Э.Д. Ершов. М., Изд-во Моск. ун-та, 2002, 682 с.
- Коробков И.Г.** Базитовые вулканоструктуры алмазоносных районов восточного борта Тунгусской синеклизы / И.Г. Коробков, А.А. Евстратов, Е.Д. Мильштейн. Томск, Изд-во STT, 2013, 270 с.
- Лелюх М.И., Крючков А.И., Устинов В.И.** О закономерностях пространственного размещения кимберлитов в Айхальском районе // Проблемы кимберлитового магматизма, Новосибирск, Наука, 1989, с. 88–97.
- Мокшанцев К.Б.** Структурный контроль проявлений кимберлитового магматизма на северо-востоке Сибирской платформы / К.Б. Мокшанцев, В.В. Еловских, В.В. Ковальский и др. Новосибирск, Наука, 1974, 97 с.
- Сараев А.К., Анташук К.М., Никифоров А.Б., Прокофьев О.М., Романова Н.Е., Денисов Р.В.** Возможности аудиомагнитотеллурических зондирований при решении структурных и поисковых задач в алмазоносных районах // Вопр. геофизики, 2010, вып. 43, с. 126–158.
- Северский Э.В., Оленченко В.В., Горбунов А.П.** Влияние локальных факторов на распространение толщ мерзлых пород перевала Жосалькезень (Северный Тянь-Шань) // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 4, с. 13–22.
- Семинский К.Ж.** Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект / К.Ж. Семинский. Новосибирск, Изд-во СО РАН, фил. “Гео”, 2003, 243 с.
- 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., Бобров А.А.** Радоновая активность разнотипных разломов земной коры (на примере Западного Прибайкалья и Южного Приангарья) // Геология и геофизика, 2009, т. 50, № 8, с. 881–896.
- Уханов А.В., Соборнов О.П., Харьков А.Д., Смирнов Г.И.** Содержание тория и урана в кимберлитах Сибири и Африки по результатам новых гамма-спектрометрических определений // Геохимия, 1982, № 8, с. 1204–1210.
- Фролов А.Д.** Электрические и упругие свойства мерзлых пород и льдов / А.Д. Фролов. Пуцдино, ОНТИ ПНЦ РАН, 1998, 515 с.
- Харьков А.Д.** Коренные месторождения алмазов мира / А.Д. Харьков, Н.Н. Зинчук, А.И. Крючков. М., Недра, 1998, 554 с.
- Шестернев Д.М.** Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны / Д.М. Шестернев. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2001, 266 с.

King C.-Y., Zhang W., King B.-S. Radon anomalies on three kinds of faults in California // Pure Appl. Geophys., 1993, vol. 141 (1), p. 111–124.

Loke M.H. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys, RES2DINV Manual. 2009. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.abem.se/files/res/2dnotes.pdf> (дата обращения: 22.12.2015).

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

Putiska R., Dostal I., Molzes A. et al. The resistivity image of the Muran fault zone (Central Western Carpathians) obtained

by electrical resistivity tomography // Geologica Carpathica, 2012, vol. 63, No. 3, p. 233–239.

Schütze C., Vienken T., Werban U. et al. Joint application of geophysical methods and Direct Push-soil gas surveys for the improved delineation of buried fault zones // J. Appl. Geophys., 2012, vol. 82, p. 129–136.

Seminsky K.Zh., Demberel S. The first estimations of soil-radon activity near faults in Central Mongolia // Radiation Measurements, 2013, vol. 49, p. 19–34.

Zarroca M., Linares R., Bach J. et al. Integrated geophysics and soil gas profiles as a tool to characterize active faults: the Amer fault example (Pyrenees, NE Spain) // Environmental Earth Sci., 2012, vol. 67, p. 889–910.

*Поступила в редакцию
25 января 2016 г.*