
П. А. Рязанцев, М. Ю. Нилов, А. В. Климовский

ОСОБЕННОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МАССИВА МАГМАТИЧЕСКИХ ГОРНЫХ ПОРОД

Введение

Электротомография является современной методикой электроразведки на постоянном токе, которая широко используется при изучении месторождений полезных ископаемых, инженерных и геологических изысканиях. Важной ее особенностью является высокая плотность замеров удельного электрического сопротивления (УЭС), равномерно распределенных в изучаемом объеме геологической среды. Как правило, данные электротомографии представляют в виде двумерной матрицы, что позволяет локализовать неоднородности различного масштаба в пространстве, опираясь на распределение электрических свойств в разрезе. Следует отметить, что в методике электротомографии играет роль как организация полевых наблюдений, так и дальнейший процесс обработки получаемых данных. Эти этапы взаимосвязаны, и на каждом из них следует учитывать специфику конкретной геологической ситуации, что отмечено рядом исследователей (Furman et al., 2003; Chambers et al., 2006; Nimmer et al., 2007; Loke, 2012).

В статье рассматриваются некоторые особенности электротомографии при изучении трещиноватости горного массива. Несмотря на преимущества такой методики при изучении разрывных нарушений, в сравнении с классическими методами на постоянном токе, практические исследования (Гайсин и др., 2011; Соколов и др., 2011; Adepelumi et al., 2006; Magnusson et al., 2010) свидетельствуют о сложности и неоднозначности интерпретации получаемых результатов. Цель данной работы – выявление особенностей применения электротомографии для изучения трещиноватости массива горных пород с последующим их учетом в процессе интерпретации. Для этого было выполнено моделирование трещиноватости горного массива в поле УЭС, а также проводился анализ и сравнение результатов решения прямой геофизической задачи и измерений в реальных условиях. В качестве объекта экспериментального изучения выбраны магматические горные породы (в частности, граниты-рапакиви Салминского массива). В большинстве случаев они характеризуются высокими удельными сопротивле-

ниями, что на фоне обводненности ослабленных зон приводит к возникновению резкого контраста в поле УЭС. Кроме того, породы такого типа широко распространены на территории Фенноскандинавского щита и востребованы как сырье для производства каменных строительных материалов.

Программное моделирование трещиноватости

Важной частью успешного применения электроразведочной геофизики является выбор физико-геологической модели (ФГМ), которая наиболее полно бы определяла особенности геологического разреза и отвечала информационным возможностям используемых методов (Колесников, 2007). Поэтому изучение особенностей моделирования при создании геоэлектрических разрезов может выступать в качестве дополнительного средства для улучшения качества последующей интерпретации. Следует отметить, что для каждой отдельной геологической ситуации и методики проводимых работ существует своя специфика создания моделей. В рамках данной работы в качестве объекта моделирования выбраны два случая – горизонтальная и вертикальная зоны трещиноватости, выдержанные по мощности и углу падения, как наиболее общий случай (рис. 1, а). Для построенных ФГМ определены следующие составляющие, уровни УЭС для которых получены по справочным данным (Петрофизика, 1992; Loke, 2012):

1) область, представляющая собой верхнюю разуплотненную часть горного массива ($УЭС = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; мощность – 2,5 м);

2) область, представляющая ненарушенный горный массив ($УЭС = 10\,000 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);

3) область, представляющая зону трещиноватости ($УЭС = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; мощность – 5 м как для вертикального, так и для горизонтального случая).

Важный момент выполнения электротомографических работ – выбор типа электродной установки. После первичного анализа поставленных задач и изучаемой среды на основе аналитических исследований была выбрана дипольная установка (dipole-dipole). Это несимметричная установка с питающими

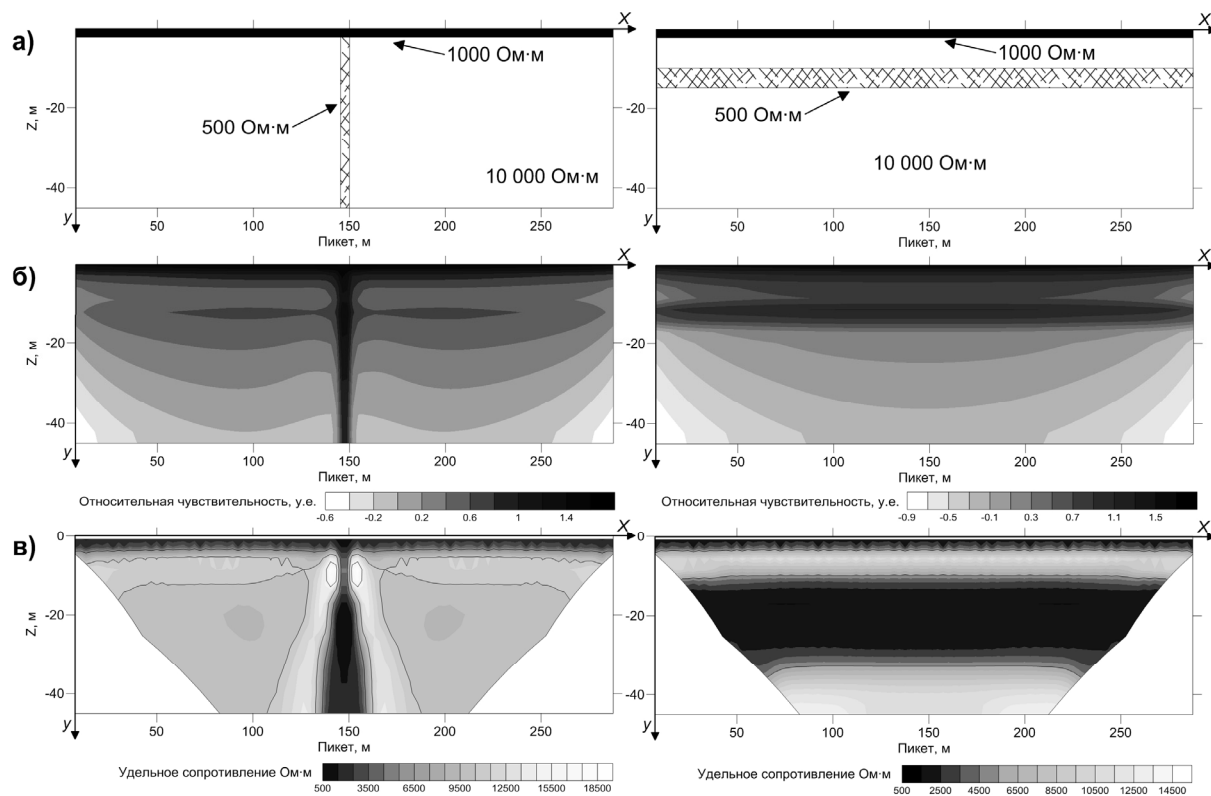


Рис. 1. Модели вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) трещиноватости:

а – физико-геологическая модель; б – модель распределения относительной чувствительности; в – геоэлектрический псевдоразрез

электродами (А-В) и приемными (М-Н) скомбинированными в диполи, которые разносятся по профилю. Как показано в ряде источников (Балков и др., 2010; Dahlin, Zhou, 2004), она имеет хорошие показатели по глубине исследования, распределению и уровню чувствительности.

Распределение чувствительности играет большую роль при расчете УЭС, поэтому следует остановиться на нем подробнее. В методике электротомографии изучаемое пространство представляется в виде набора элементарных блоков (ячеек). Значение чувствительности является мерой количества информации о реальном сопротивлении единичного блока модели, содержащейся в измеряемых данных. Чем больше ее значение, тем более обоснованным является рассчитываемое УЭС (Loke, 2012). Например, приповерхностные блоки модели имеют большую чувствительность из-за близости к электродам, а с увеличением глубины чувствительность уменьшается экспоненциально. Анализ чувствительности позволяет оптимизировать процесс измерения и обработки данных электротомографии (Furman et al., 2003).

В связи с этим для каждой из предложенных ФГМ в программе Res2dmod рассчитаны модели распределения чувствительности (рис. 1, б). Проанализировав полученный результат, можно сделать вывод о том, что наличие единичного контрастного объекта (даже такого простого, как предложенные зоны трещиноватости) приводит к характерному перераспределению чувствительности. Для вертикального нару-

шения это выражается локализованной областью, соответствующей расположению аномальной области, а также в появлении аномальных боковых зон на глубине 12 м, в интервале пикетов 55х – 240х (здесь и далее х – положение точки на разрезе по горизонтали, у – положение по вертикали). В случае горизонтального нарушения область чувствительности менее контрастна и располагается в широком диапазоне пикетов 0х ... 280х, –8у ... –18у.

Оценим влияние таких особенностей на распределение и величину блоков удельных сопротивлений. Для этого сначала решается прямая геофизическая задача, т. е. по ФГМ восстанавливается поле УЭС. Далее выполняется инверсия (решается обратная геофизическая задача), по результатам которой строятся псевдоразрезы УЭС (под «псевдоразрезом» подразумевается матрица УЭС, с той или иной степенью достоверности отражающая реальную геологическую обстановку изучаемого объема среды). Благодаря этому появляется возможность сопоставить искомые объекты и их модельное отображение (рис. 1, в). Сначала рассмотрим модель вертикального нарушения. В общем случае полученный результат позволяет достоверно выделить искомый объект лишь на качественном уровне. Погрешность при моделировании, обозначающая степень сходимости исходного и рассчитанного наборов данных, составила 0,76%. Полученная картина осложнена появлением симметричных ложных аномалий УЭС. Особенно ярко они проявляются на пикетах –10у ... 140х, –10у ... 155х,

сопротивление которых почти в два раза превышает заданную величину в исходной ФГМ. Также характерным является расфокусировка аномалии относительно границ объекта, расширяющаяся с глубиной.

Далее обратимся к модели, описывающей горизонтальное нарушение. Она более выдержана как по распределению, так и по уровню УЭС по сравнению с вертикальной зоной, погрешность составила 0,84%. В среднем значения фона близки к заданным в исходной модели, тогда как аномальная зона характеризуется трехкратным завышением уровня УЭС. Кроме того, искомым зоне трещиноватости, заданной мощностью 5 м, соответствует аномальная область псевдоразреза мощностью 20 м, вследствие чего локализация искомого объекта затруднена. Выявленные особенности имеют явную связь с распределением чувствительности, которая в свою очередь зависит от свойств геологической среды и методики измерения.

Анализ синтетических данных позволяет определить негативные эффекты, возникающие при обработке электротомографических данных, и учитывать их при интерпретации реальных измерений.

Интерпретация результатов полевых работ

Для проверки результатов компьютерного моделирования использовались данные опытно-методических работ по изучению трещиноватости, проведенные на Салминском массиве гранитов-рапакиви, расположенном в Республике Карелия. Этот массив – один из нескольких плутонов, расположенных вдоль южной краевой части Фенноскандинавского щита в виде пояса, в котором он занимает наиболее восточное положение и является по времени образования самым молодым (Светов, Свириденко, 1991). Практический интерес к изучению гранитов-рапакиви обусловлен возможностью разведки новых месторождений облицовочного камня, что требует детального изучения трещиноватости. Исследование нарушений и тектонических напряжений в пределах Салминского массива показало, что современная картина его трещиноватости обусловлена как прототектоникой, так и новейшей тектоникой (Иванов, Шеков, 2012). В пределах массива был выделен ряд участков, на которых выполнялись опытно-методические работы по изучению трещиноватости с использованием геофизики.

Для проведения работ использовалась многоэлектродная электроразведочная станция «СКАЛА-48» с двумя 24 электродными косами (Балков и др., 2010). Шаг позиций электродов равнялся 5 м, такая геометрия позволила получить длину линии 235 м и максимальную глубину исследований в пределах 45 м. Как и при синтетическом моделировании, измерения проводились дипольной установкой. Следует отметить, что на получаемый в дальнейшем результат сильно повлияли свойства гранитов-рапакиви (табл.). Особенно заметно влияние минералогического состава на уровень УЭС.

Рассмотрим два перпендикулярных профиля (обозначенные А–Б и В–Г, длиной 230 м каждый), выполненных на крупном естественном обнажении в пределах Салминского массива (рис. 2). Вдоль каждого профиля выполнены измерения методикой электротомографии, в результате чего сформированы два массива данных, содержащих по 960 точек замеров. По результатам измерений выполнена математическая инверсия, которая позволила подобрать модель, характеризующую распределение УЭС вдоль профиля. Рассчитанная модель характеризуется крайне сильной градацией значений от 1500 Ом · м до 100 кОм · м и общим повышенным уровнем УЭС. Это является следствием геологических особенностей изучаемого объекта, которые включают минеральный состав, наличие трещиноватости, а также методических особенностей электротомографии, таких как заземление электродов, контраст УЭС, возникновение ложных аномалий при обработке. В результате уровень погрешности моделирования составил 17,7%.

Минеральный состав и петрофизические свойства гранитов-рапакиви (по: Клабуков, 2006; Мясникова и др., 2010)

Минеральный состав		
	Min %	Max %
Ортоклаз (микроклин)	45	56
Плагиоклаз	11	13
Кварц	22	28
Биотит (мусковит)	3	6
Петрофизические свойства		
	Min	Max
Средняя плотность, г/см ³	2,52	2,66
Скорость продольных волн, км/с	3,80	5,38
Удельное сопротивление, кОм · м	0,8	17
Магнитная восприимчивость, 10 ⁻⁶ СГС	0	1500

Первичный анализ установил наличие разрывных нарушений различных направлений, которые маркируются областями пониженных сопротивлений. Интересный результат моделирования – выделение мощной зоны пониженных сопротивлений (3–10 кОм · м), локализованной между пикетами 80х ... 160х, –18у ... –38у по профилю А–Б и 140х ... 220х, –18у ... –40у по профилю В–Г. В геологическом плане данная область связана с распространением крупного субгоризонтального нарушения с сопутствующей механической и химической дезинтеграцией пород и образованием дресвы, что характерно для процессов катаклаза и выветривания гранитов-рапакиви (Harma, Selonen, 2008). На основе численного моделирования, проведенного выше, можно предположить, что истинная мощность такого нарушения варьирует в пределах 4–6 м и его центр расположен на глубине порядка 20–25 м. Следует отметить, что при использовании только геологических методов без привлечения бурения выделить подобные объекты невозможно. Уверенно на обоих разрезах выделяется приповерхностный слой мощностью 4–5 м, с сопротивлениями не более 4 кОм · м. Он относится к приповерхностной области повышенной трещиноватости и как следствие обводненности.

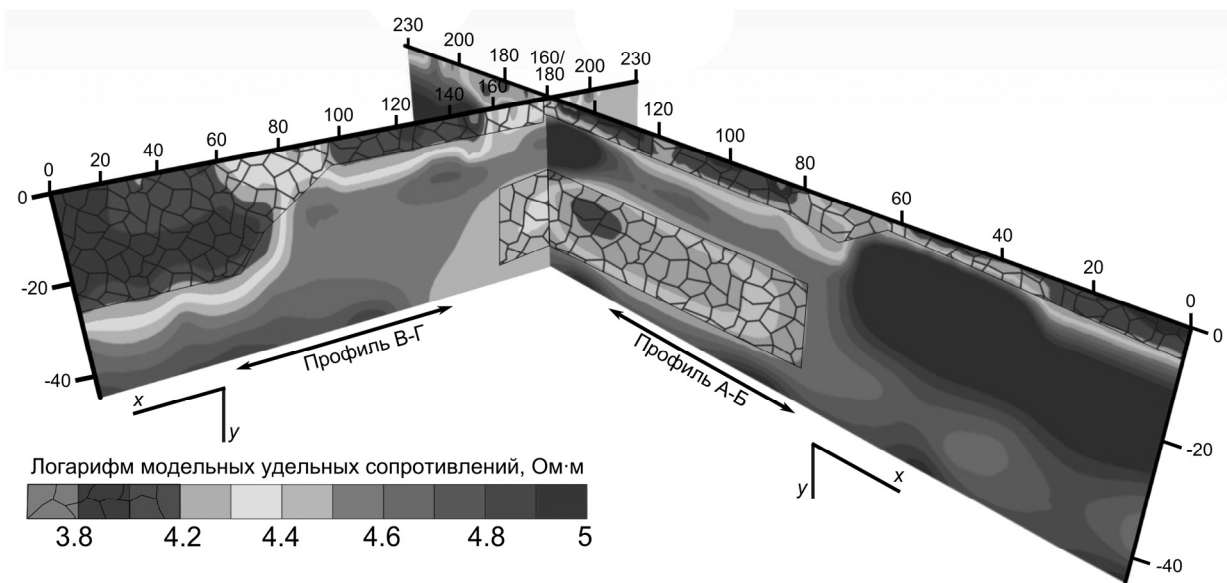


Рис. 2. Два перпендикулярных профиля электротомографии (штриховкой обозначены нарушенные области)

На пикетах $0x \dots 70x$ профиля В–Г наблюдается мощная зона пониженных сопротивлений (до глубины 25 м), которая приурочена к понижению рельефа коренных пород. Несмотря на чувствительность дипольной установки к вертикальным границам, субвертикальные нарушения на геоэлектрических разрезах проявлены слабее по сравнению с горизонтальными и выделяются в основном по косвенным признакам. Как показало моделирование с использованием синтетических данных, субвертикальным нарушениям сопутствует возникновение ложных аномалий повышенных значений. Используя эту особенность, можно предположить наличие подобных зон в интервале пикетов $70x-80x$, $95x-105x$, $115x-125x$ по профилю А–Б и $100x-120x$, $155x-165x$ по профилю В–Г.

Привлечение дополнительной информации к интерпретации электротомографии способствует выделению новых деталей, влияющих на создание геоэлектрической модели. Для детального анализа получаемой картины УЭС по данному профилю А–Б построены распределения относительной чувствительности и уровня невязки (рис. 3). На карте чувствительности можно выделить несколько характерных особенностей. Это, прежде всего, неравномерное распределение значений, которое свидетельствует о наличии неоднородностей в горном массиве. Хорошо локализованы области понижения значений с 0,6 до 0,25 условных единиц на пикетах $30x-60x$, $10y-20y$ и $140x-190x$, $10y-20y$ (рис. 3, а). Они совпадают с наиболее высокоомными участками псевдоразреза удельных сопротивлений. Вероятней всего, именно такое распределение чувствительности и вызывает мнимое увеличение УЭС, в результате чего образуются аномалии, не имеющие геологического эквивалента. В интервале пикетов $60x-135x$, $10y-30y$ наблюдается область плавного повышения чувстви-

тельности. Эта область соответствует предполагаемой зоне дробления. Так как она попадает в область малой чувствительности и низкой разрешающей способности, модельное сопротивление в ее пределах занижено относительно истинных значений и имеет резкий контраст относительно окружающей обстановки, из-за чего площадь распространения аномалии увеличивается.

Интересным фактом является и то, что по распределению уровня невязки (т. е. расхождения измеренных и рассчитанных данных) наибольший процент расхождения, до 38%, характерен для описанных ложных аномалий (рис. 3, б). Как уже отмечалось, появление подобных аномалий связано с контрастной зоной перехода между относительно проводящей верхней и монолитной нижней зоной высокого сопротивления. Кроме того, локальные приповерхностные неоднородности (которыми могут служить отдельные трещины) вносят значительные искажения и ложные аномалии. Подобный эффект выделяется в ряде случаев при выполнении вертикальных электрических зондирований и носит название С-эффект (Электроразведка..., 1994).

Заключение

В результате проведенных исследований по синтетическому моделированию геоэлектрических свойств нарушенности массива магматических горных пород, удалось установить ряд характерных особенностей.

1. Мнимое увеличение уровня удельных сопротивлений при построении модели по сравнению с реальными величинами.
2. Наличие контрастов удельных сопротивлений и как следствие возникновение областей резких градиентов.

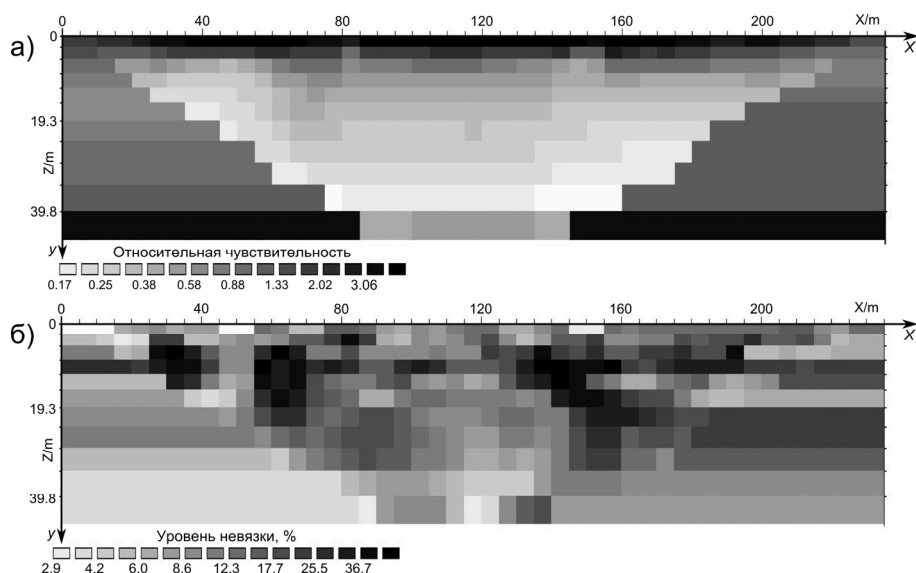


Рис. 3. Разрезы по профилю А–Б:

а – относительной чувствительности (в безразмерных единицах); б – уровня невязки между измеренными и рассчитанными данными (в процентах)

3. Возникновение ложных аномалий и изменение уровня удельных сопротивлений из-за влияния маломощных проводящих объектов.

4. Высокий процент расхождения измеренных и модельных данных в областях распространения геологических неоднородностей.

Опытнo-методические работы на Салминском массиве гранитов-рапакиви подтвердили коррект-

ность сделанных выводов. Учет факторов, полученных по результатам анализа синтетических моделей, позволяет корректнее выполнять интерпретацию результатов данных электротомографии для магматических горных массивов, особенно в районах с недостаточной геологической изученностью.

ЛИТЕРАТУРА

- Балков Е. В., Панин Г. Л., Манштейн Ю. А. и др.* Электротомография: аппаратура, методика и опыт применения // [Электронный ресурс], www.nemfis.ru. 2010. 21 с.
- Гайсин Р. М., Набатов В. В., Дудченко Т. Ю.* Опыт электротомографического исследования геомассива в зоне расположения коллекторов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 10. С. 118–121.
- Иванов А. А., Шеков В. А.* Методологические основы оценки месторождений блочного камня // Горный журнал. 2012. № 5. С. 44–47.
- Клабуков Б. Н.* Возможности петроэлектрики в изучении земной коры Карелии // Геология и полезные ископаемые Карелии. Вып. 9. Петрозаводск. 2006. С. 127–135.
- Колесников В. П.* Основы интерпретации электрических зондирований. М., 2007. 248 с.
- Мясникова О. В., Горбацевич Ф. Ф., Шеков В. А. и др.* Физические и механические свойства гранитоидов различных генетических типов // Вестник ОНЗ РАН. 2010. Т. 2. С. 179–184.
- Петрофизика: Справочник* / Под ред. Н. Б. Дортман. М., 1992. 391 с.
- Светов А. П., Свириденко Л. П.* Магматизм шовных зон Балтийского щита. Л., 1991. 200 с.
- 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.
- Электроразведка методом сопротивлений: Учебное пособие* / Под ред. В. К. Хмелевского, В. А. Шевнина. М., 1994. 160 с.
- Adepelumi A. A., Yi V. J., Kim J. H. et al.* Integration of surface geophysical methods for fracture detection in crystalline bedrock of southwestern Nigeria // Hydrogeology Journal. 2006. N 14. P. 1284–1306.
- Chambers J. E., Kuras O., Meldrum P. I., Ogilvy R. D.* Electrical resistivity tomography applied to geologic, hydrogeologic, and engineering investigations at a former waste-disposal site // Geophysics. 2006. Vol. 71. P. 231–239.
- Dahlin T., Zhou B. A.* Numerical Comparison of 2-D Resistivity Imaging with Ten Electrode Arrays // Geophysical Prospecting. 2004. N 52. P. 379–398.
- Furman A., Ferre P. A., Warrick A. W.* A sensitivity analysis of electrical resistivity tomography array types using analytical element modeling // Vadose Zone Journal. 2003. Vol. 2. P. 416–423.
- Harma P., Selonen O.* Surface weathering of rapakivi granite outcrops implications for natural stone exploration and quality evaluation // Estonian Journal of Earth Sciences. 2008. Vol. 57, N 3. P. 135–148.
- Loke M. H.* Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys // [Электронный ресурс], www.geotomo.com. 2012. 148 p.
- Magnusson M., Fernlund J., Dahlin T.* Geoelectrical imaging in the interpretation of geological conditions affecting quarry operations // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2010. N 3. P. 465–486.
- Nimmer R. E., Osiensky J. L., Binley A. M. et al.* Electrical resistivity imaging of conductive plume dilution in fractured rock // Hydrogeology Journal. 2007. Vol. 15, N 5. P. 877–890.