

УДК 550.837

## КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОЗОНДИРОВАНИЙ ПРИ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2014 г. О.И. Фёдорова

*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Приводится теоретическое обоснование использования электротзондирований с дифференциальной установкой для выявления локальных геоэлектрических неоднородностей среды. На примере изучения состояния грунтового гидротехнического сооружения и верхней части геологического разреза в районе загрязнения подземных вод показана эффективность комплексирования вертикальных и дифференциальных зондирований для решения инженерно-геологических и геоэкологических задач.

**Ключевые слова:** дифференциальная установка, вертикальные и дифференциальные зондирования, геоэлектрическая неоднородность, разность потенциалов.

### Введение

Существует целый ряд электроразведочных установок для изучения геосреды методами зондирования с контролируемым источником возбуждения электромагнитного поля. Наибольшее распространение нашли зондирования с кондуктивным возбуждением постоянного (низкочастотного) тока, среди которых предпочтение отдается вертикальным электрическим зондированиям (ВЭЗ), использующим симметричную установку (рис. 1, *слева*). Метод ВЭЗ разработан для изучения горизонтально-слоистых сред и дает возможность получать информацию о мощности слоев, дифференцируемых по удельному сопротивлению. Однако верхняя неоднородная часть геологического разреза не всегда удовлетворяет такой модели (особенно в горных провинциях), и тогда становится невозможной количественная интерпретация результатов. Тем не менее, ВЭЗ часто используют в малоглубинной геоэлектрике, ограничиваясь качественной обработкой полученных данных – построением разрезов кажущихся сопротивлений среды ( $\rho_k$ ).



**Рис. 1.** Схемы симметричной установки, используемой в методе ВЭЗ (*слева*), и дифференциальной  $MAN$ , в которой питающее заземление  $B$  отнесено в практическую бесконечность (*справа*).  $A, B$  – питающие заземления;  $M, N$  – приемные;  $\Delta U$  – измеряемая разность потенциалов

Известны также методы чистых аномалий на постоянном токе, одним из которых является дифференциальный метод  $MAN$  [Тархов, 1957]. Питающий и приемный диполи в этом случае располагаются так, чтобы в горизонтально-слоистой и однородной среде измеряемая разность потенциалов  $\Delta U$  была равна нулю и при появлении геоэлектрической неоднородности фиксировались ее аномальные значения (рис. 1, *справа*).

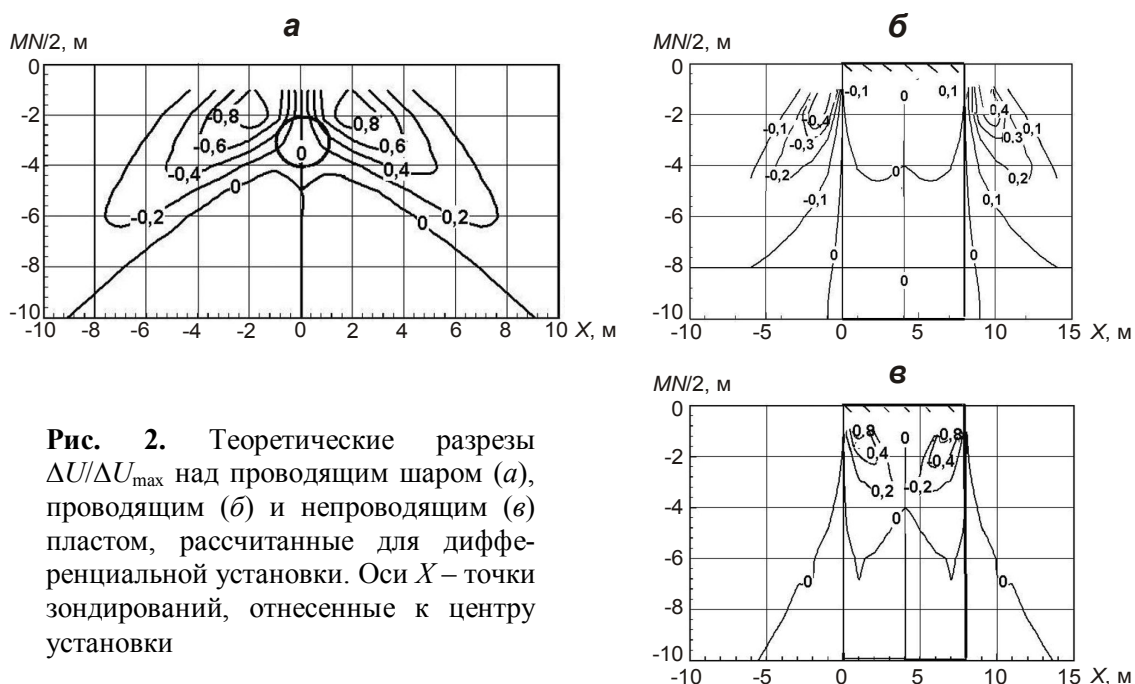
В варианте профилирования этот метод в 50-е годы прошлого столетия был предложен для поиска глубоко залегающих геологических объектов (рудных месторождений), но не нашел широкого применения в геофизической практике, по всей видимости, из-за недостаточной теоретической проработанности и трудоемкости проведения полевых измерений [Блох, 1971; Григорьева, 1953].

В последние десятилетия электроразведка всё чаще применяется при инженерно-геологических, геоэкологических и других малоглубинных исследованиях. В качестве примера можно назвать работы [Улитин, Федорова, 1999; Улитин и др., 2000], в которых теоретически и экспериментально обосновано применение профилирования с дифференциальной установкой *MAN* в геоэлектрической методике контроля состояния грунтовых гидротехнических сооружений. При этом весьма эффективным может быть использование методов чистых аномалий, наиболее чувствительных к приповерхностным неоднородностям, в комплексе с методами сопротивлений.

### Методика и результаты экспериментальных исследований

Дифференциальное электропрофилирование позволяет выявить местоположение неоднородности на профиле наблюдений и приближенно определить ее вертикальные контакты с вмещающей средой. В разрезе геоэлектрическую характеристику аномальной разности потенциалов, возникающей вокруг неоднородности, можно получить зондированием при увеличении разноса приемных заземлений *MN* в точке наблюдений (в центре установки находится питающее заземление *A*). Изменение разности потенциалов с глубиной качественно отображается на разрезе  $\Delta U = f(MN/2)$ .

Для теоретического обоснования возможности электроразведок с дифференциальной установкой *MAN* были выполнены теоретические расчеты над двумя локальными неоднородностями – погруженным шаром и безграничным вертикальным пластом, выходящим на поверхность [Улитин, Федорова, 2009]. Теоретический разрез  $\Delta U/\Delta U_{\max}$  над центром проводящего шара с  $\rho_2/\rho_1 = 0.1$  и  $h/r = 3$ , где  $\rho_2, \rho_1$  – удельное сопротивление шара и вмещающей среды,  $r$  – радиус шара,  $h$  – глубина до центра шара, представлен на рис. 2, *а*. Расчеты для вертикального пласта выполнены в двух вариантах – для проводящего ( $\rho_2/\rho_1 = 1/9$ , рис. 2, *б*) и непроводящего ( $\rho_2/\rho_1 = 9$ , рис. 2, *в*) пластов.



**Рис. 2.** Теоретические разрезы  $\Delta U/\Delta U_{\max}$  над проводящим шаром (*а*), проводящим (*б*) и непроводящим (*в*) пластом, рассчитанные для дифференциальной установки. Оси  $X$  – точки зондирования, отнесенные к центру установки

Отметим основные особенности распределения разности потенциалов  $\Delta U$ . Локальные неоднородности выделяются знакопеременными экстремальными значениями  $\Delta U$ . Для изометричных тел и тел с субвертикальными границами основная нулевая изолиния проходит в срединной части объекта, другие разделяют положительные и отрицательные значения  $\Delta U$  малой величины и на практике, вероятнее всего, не будут проявляться. Максимальные значения  $\Delta U$  располагаются над верхней кромкой погруженных объектов, и, как показали расчеты над шаром, расстояние между отрицательным и положительным экстремумами для изометричного объекта приближенно равно глубине до его центра (рис. 2, а). По уменьшению аномалии с глубиной можно приближенно ограничить вертикальную мощность объекта. Так, для погруженного проводящего шара, глубина до центра которого превышает радиус в три раза,  $\Delta U$  на уровне нижней кромки шара составляет около 10% от максимального значения разности потенциалов. Зоны вертикальных контактов объекта с вмещающей средой в разрезе отмечаются вблизи экстремумов, располагающихся в среде с более высоким удельным сопротивлением (рис. 2, б, в).

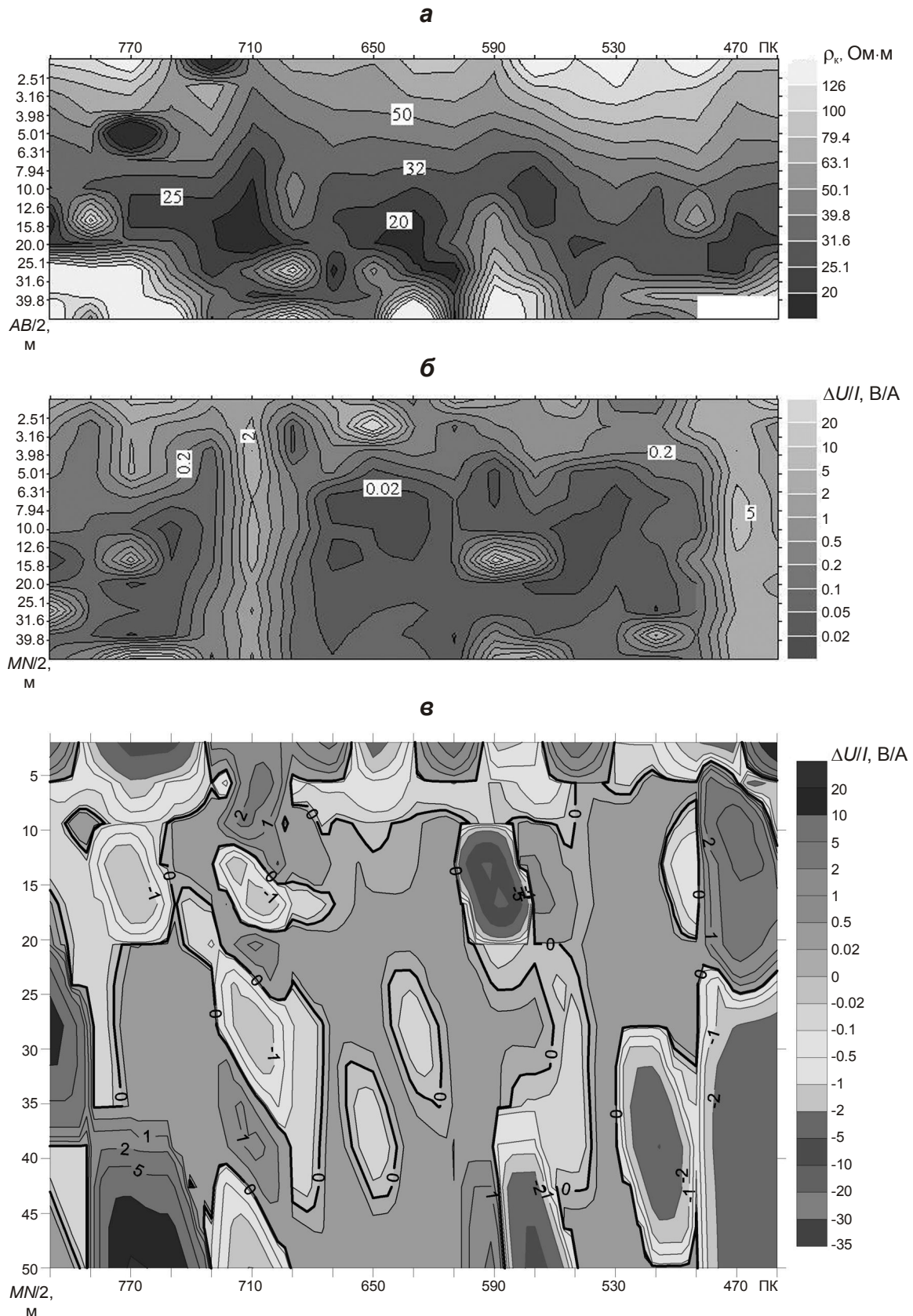
Благодаря своей высокой чувствительности дифференциальная установка позволяет изучать распространение локальных (в том числе крутопадающих) объектов в разрезе, но из-за своей специфики не дает возможности определять электрическое сопротивление как аномального объекта, так и вмещающей среды. Поэтому эта методика зондирований должна применяться в комплексе с каким-либо из методов сопротивлений, например, как это предлагается в [Улитин, Фёдорова, 2008], с ВЭЗ.

Впервые комплекс вертикальных и дифференциальных электрозондирований был опробован при изучении состояния искусственного инженерного объекта – плотины, ограждающей накопитель жидких отходов производства крупного химического предприятия в Челябинской области. Плотина высотой 15–18 м сложена из грунтового насыпного материала. Согласно геологической карте масштаба 1:200 000, она располагается в зоне контакта терригенно-осадочных пород, представленных алевролитами, песчаниками, углисто-кремнистыми и углисто-глинистыми сланцами, и магматических пород с преобладанием диабазов и диабазовых порфиритов.

Экспериментальные работы проводились по верхнему бьефу центральной части плотины, где ранее по результатам геоэлектрических исследований были обнаружены участки, в пределах которых предположительно происходит просачивание воды из водохранилища. Пункты измерений размещались по линии профиля с шагом 20 м; максимальный полуразнос зондирований  $AB/2(MN/2)$  составлял 50 м; бесконечность для дифференциальной установки – 350 м.

Полученные кривые ВЭЗ показали значительную неоднородность как насыпного материала плотины, так и подстилающих пород, что хорошо видно на разрезе кажущихся сопротивлений  $\rho_k$  (рис. 3, а). В этом случае выполнить количественную обработку данных по существующим программам, основанных на горизонтально-слоистой модели среды, не представляется возможным.

Качественная интерпретация выявила следующие электрофизические особенности изучаемой среды. Вблизи поверхности кажущееся сопротивление грунта практически по всему профилю превосходит 50 Ом·м. При увеличении полуразносов питающих заземлений сопротивление грунтового материала уменьшается. На разрезе  $\rho_k$  по всей длине профиля выделяется зона пониженного (менее 30 Ом·м) сопротивления, верхняя граница которой ограничивается полуразносами 8–10 м, нижняя – 20–40 м, а на ПК 730–710 и 650–630 электросопротивление составляет менее 20 Ом·м при полуразносах 10–20 м. В основании разреза чередуются участки повышенного (более 200 Ом·м) и пониженного (30–40 Ом·м) кажущегося сопротивления.



**Рис. 3.** Результаты электротондирований по верхнему бьефу плотины: *а* – разрез кажущихся сопротивлений по результатам ВЭЗ; *б, в* – разрезы приведенных к току абсолютных (*б*) и измененных с учетом знака разности потенциалов (*в*) значений по результатам дифференциальных зондирований

На разрезе абсолютных значений  $\Delta U/I$  (рис. 3, б) выявлены две поверхностных аномалии. Первая (ПК 770) приурочена, по всей видимости, к обнаруженной ранее и на момент проведения измерений уже затампонированной каверне, которая согласно результатам заверочного бурения находилась на отметках 2.4–5.3 м. Нижняя граница аномального объекта отмечается изолинией 0.2–0.5 В/А на полуразносах 5–6 м.

На разрезе  $\rho_k$  (см. рис. 3, а) высокоомный затампонируемый участок выделяется не достаточно четко, но на полуразносе 5 м фиксируется низкоомная аномалия, что свидетельствует о просачивании воды из накопителя глубже устраненного дефекта в теле насыпи. Аномалия повышенных значений разности потенциалов на ПК 650, обнаруженная дифференциальным зондированием, на разрезе проявляется слабо, незначительным повышением  $\rho_k$ . Можно предположить, что здесь происходит разуплотнение насыпного материала.

На ПК 710 прослеживается вертикальная аномалия повышенных значений  $\Delta U/I$ . В этом месте рядом с точкой измерений находились три тампонажных скважины, и, по всей видимости, также были обнаружены пустоты, о чем нам не было известно. Поскольку повышенные значения разности потенциалов фиксируются в интервале полуразносов 2–15 м, можно предположить, что тампонаж проведен сквозь всю насыпь до основания плотины. На разрезе кажущихся сопротивлений (см. рис. 3, а) вблизи этой точки фиксируется проводящая зона, в которой минимальные значения  $\rho_k$  соответствуют интервалу полуразносов 10–20 м, т.е. пустоты в насыпи были устранены тампонажом, но при этом не была решена проблема фильтрации воды из накопителя.

Вторая вертикальная аномалия  $\Delta U/I$  выявлена на ПК 490–470. Максимальные значения измеряемой разности потенциалов находятся в интервале полуразносов 7–15 м, а минимальные значения  $\rho_k$  – 15–30 м. Геоэлектрическая морфология поля на этих пикетах схожа с ситуацией на ПК 710. Возможно, здесь происходит фильтрация воды через среднюю и нижнюю части насыпи с вероятным размыванием грунта и образованием зоны разуплотнения в теле плотины.

Кроме аномалий с повышенными значениями разности потенциалов, на разрезе дифференциальных зондирований отмечаются аномалии пониженных значений (менее 0.05–0.02 В/А). Они могут быть связаны либо с горизонтальной слоистостью среды, либо с контактирующими неоднородностями, имеющими малые удельные сопротивления. Как видно на разрезе  $\rho_k$  (см. рис. 3, а), среда существенно неоднородна, поэтому вероятнее идентификация аномалий пониженных значений  $\Delta U/I$  с зонами пониженных электросопротивлений. Область пониженных разностей потенциалов, как и область пониженных значений  $\rho_k$ , прослеживается вдоль всего изучаемого участка, но по глубине они совпадают не везде. Так, аномалия  $\Delta U/I$  (менее 0.02 В/А) на ПК 670–630 прослеживается в интервале полуразносов 6–15 м, а аномалия  $\rho_k$  (менее 20 Ом·м) – 12–25 м. Верхняя кромка аномальной зоны разности потенциалов на ПК 550–510 фиксируется на глубине 5 м (ПК 530), а по аномалии  $\rho_k$  – 10 м (ПК 510). Нижняя граница аномалии  $\Delta U/I$  вытягивается до ПК 570, у аномалии  $\rho_k$  – до ПК 550. На ПК 590 вглубь от основания плотины (полуразнос 15–20 м) прослеживается высокоомная область, которая по дифференциальным зондированиям разделяется на две аномалии.

Геоэлектрическая характеристика исследуемого объекта, полученная по абсолютным значениям  $\Delta U/I$ , подтверждается и уточняется по разрезу измеренных значений разности потенциалов с учетом знака (рис. 3, в). Приповерхностные аномалии выделяются максимальными знакопеременными значениями  $\Delta U$  и ограничиваются по глубине нулевыми изолиниями примерно до 5 м. Вертикальная аномалия с центром на ПК 710 детализируется знакопеременными экстремумами. В теле плотины это может быть связано с разной влагонасыщенностью грунта вблизи тампонажных скважин, а в геологической среде – с чередованием зон повышенной и пониженной проницаемости горных пород.

Восточная проводящая аномалия, развивающаяся в теле плотины на ПК 470, ограничивается по глубине нулевой изолинией на отметке 25 м. На ПК 690–550 выявляется зона пониженных разностей потенциалов, ограниченная снизу нулевой изолинией на полуразносах 10–12 м. Здесь в центральной части насыпи происходит утечка воды из накопителя и ее фильтрация в геологическую среду, что подтверждается просачиванием воды на дневную поверхность у подножия плотины.

Обобщая результаты комплексных геоэлектрических зондирований гидротехнического сооружения, отметим следующее. На электрофизические характеристики плотины влияют несколько факторов: разный гранулометрический состав грунтового материала; погрешности в технологии строительства плотины, особенно ее основания; слабая гидроизоляционная защита насыпи со стороны водоема и др. Поэтому на разрезах зондирований наблюдается сложная морфология электрического поля, связанная, в первую очередь, с просачиванием воды из водохранилища, с фильтрацией ее в основание плотины и вглубь геологического разреза, с образованием зон разуплотнения и кавернозности в теле плотины. Вертикальные зондирования дают интегральную характеристику электросопротивления среды, на фоне которой небольшие неоднородности проявляются нечетко. Зондирования с дифференциальной установкой более чувствительны к локальным объектам, детализируя геоэлектрические особенности изучаемой среды. По разрезу кажущихся сопротивлений определяются области повышенной проводимости в насыпи, связанные с переувлажнением грунта, которые уточняются и локализуются на разрезах разности потенциалов. По результатам дифференциальных зондирований отмечаются вертикальные аномалии, приуроченные к зонам нарушенности пород, которые образовались в пределах развитой в этом районе надвиговой структуры; по этим зонам загрязненные воды из накопителя фильтруются в геологическое пространство.

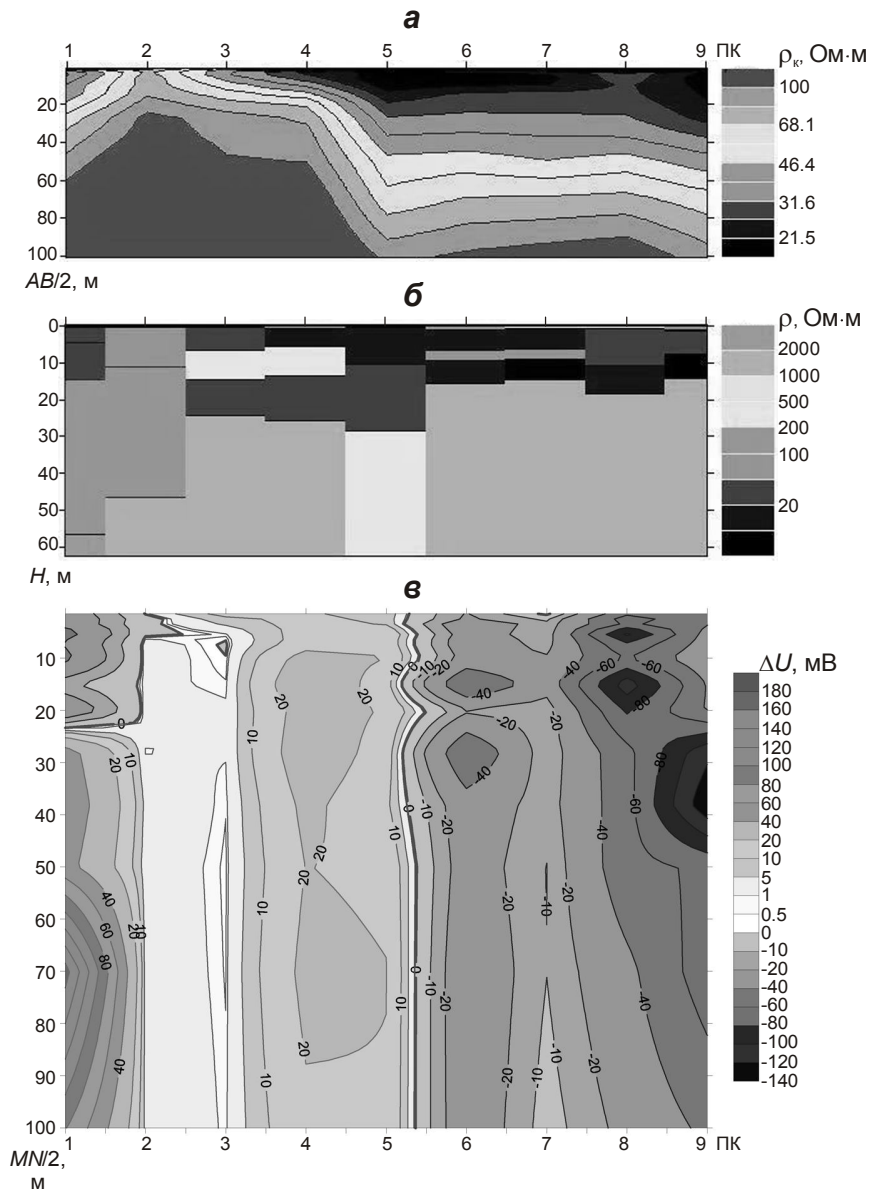
Комплексная методика электротондирований была использована при исследованиях на геоэкологическом полигоне в районе естественного накопителя жидких высокоминерализованных отходов производства. В пределах исследуемого участка распространены эффузивные породы девонского комплекса, представленные базальтовыми и андезито-базальтовыми порфиритами, туфами, туфопесчанниками. По гидрогеологическим данным, из накопителя по водопроницаемым породам рыхлых осадочных отложений мигрируют токсичные воды.

Опытно-методические работы были проведены на опорном профиле, проходящем вкрест простирания проводящей зоны, выявленной ранее комплексными электрометрическими методами. Точки наблюдений размещались через 40 м, максимальный полуразнос зондирований составил 100 м, бесконечность – 1000 м.

По результатам ВЭЗ в верхней части разреза на ПК 4–9 наблюдается зона низких значений кажущихся сопротивлений –  $\rho_k \sim 20$  Ом·м (рис. 5, а). На разрезе дифференциальных зондирований (рис. 5, в) в районе ПК 5 происходит смена знака разности потенциалов, нулевая изолиния протягивается от поверхности вглубь разреза, что указывает на наличие протяженной проводящей вертикальной структуры, предположительно тектонической, границы которой проходят в районе максимальных значений  $\Delta U$  (ПК 4, 6). На ПК 1, 6, 8, 9 наблюдаются локальные аномалии  $\Delta U$ , которые указывают на наличие в среде проводящих и непроводящих областей.

С учетом особенностей, выявленных на разрезе дифференциальных зондирований, по программе *IPI2win*<sup>1</sup> в рамках эквивалентности горизонтально-слоистой среды проведена количественная интерпретация данных ВЭЗ и построен один из возможных вариантов геоэлектрического разреза (рис. 4, б). Мощность рыхлых песчано-глинистых пород в среднем составляет 15–25 м.

<sup>1</sup> Программа, разработанная А.А. Бобачевым (МГУ), поставляется вместе с комплектом аппаратуры ЭРА-МАХ, используемой при проведении рассматриваемых в статье наблюдений.



**Рис. 4.** Результаты исследований на экологическом полигоне методами ВЭЗ (*а, б*) и дифференциального зондирования (*в*): *а* – разрез кажущихся сопротивлений; *б* – удельных сопротивлений; *в* – значений разности потенциалов

Загрязненные подземные воды, по всей видимости, распространяются в первом водопроницаемом горизонте грунтовых вод (ПК 4–9), удельное сопротивление которого составляет 18–20 Ом·м, а подошва находится на глубине менее 10 м. Вероятно, что они мигрируют и по второму водоносному горизонту, так как его электросопротивление на ПК 6–9 варьирует в пределах 11–14 Ом·м.

На ПК 5–6 токсичные воды по трещиноватым породам тектонической структуры могут опускаться в нижние слои и распространяться на большие расстояния.

### Заключение

Первый опыт применения комплекса вертикальных и дифференциальных электрозондирований показал его перспективность для решения задач инженерной геофизики.

Такая методика позволяет увереннее изучать горизонтально-слоистые среды, осложненные локальными неоднородностями, в том числе крутопадающими.

Наиболее информативными являются вертикальные зондирования, поскольку интерпретация их результатов в рамках 1D-2D-3D инверсии дает возможность получить данные об электрофизических свойствах изучаемой геосреды.

Качественная обработка результатов дифференциального зондирования позволяет выделять геоэлектрические неоднородности в разрезе, расширяя информацию о структуре среды, и может быть учтена при количественном анализе данных ВЭЗ.

В работе приводится пример 1D инверсии результатов ВЭЗ, выполненной с учетом анализа особенностей разреза дифференциальных зондирований. При сильной неоднородности среды может иметь место совместный качественный подход к интерпретации комплексных зондирований.

Предлагаемый комплексный способ электротондирований целесообразно использовать в малоглубинной геоэлектрике при изучении верхней части геологического разреза, грунтовых инженерных объектов.

### Литература

- Блох И.М.* Электропрофилирование методом сопротивлений. Изд. 2-е. М.: Недра, 1971. 216 с.
- Григорьева Н.П.* Сравнение аномалий  $\rho_k$  над проводящей сферой для различных установок метода постоянного тока // Труды ВИРГ. М.: Госгеолтехиздат, 1953. С.83–102.
- Тархов А.Г.* Об электроразведочных методах чистой аномалии // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1957. № 8. С.979–989.
- Улитин Р.В., Федорова О.И.* Кондуктивное дифференциальное профилирование при решении инженерных и геоэкологических задач // Деп. в ВИНТИ. № 2474-В99. 1999. 15 с.
- Улитин Р.В., Федорова О.И.* Способ геоэлектроразведки. Патент № 2332690. Пер. 27.08.2008. Бюл. № 24. 2008.
- Улитин Р.В., Федорова О.И.* Особенности распределения электрического поля при дифференциальном электротондировании над локальными неоднородностями // Уральский геофизический вестник. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. № 1. С.65–69.
- Улитин Р.В., Гаврилова И.Э., Петухова Ю.Б., Федорова О.И., Харус Р.Л.* Геоэлектрика при решении геоэкологических и инженерно-геологических задач // Теория и практика геоэлектрических исследований: Сб. науч. трудов. Вып. 2. Екатеринбург: УрО РАН, 2000. С.84–98.

*Сведения об авторе*

**ФЁДОРОВА Ольга Ивановна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича РАН. 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 100. Тел.: (343)267-89-00. E-mail: fougeo@mail.ru

## COMPLEXING VERTICAL AND DIFFERENTIAL ELECTRICAL SOUNDING DURING ENGINEERING-GEOLOGICAL AND GEOECOLOGICAL EXPLORINGS

O.I. Fedorova

*Bulashevich Institute of Geophysics of Urals Branch RAS, Yekaterinburg, Russia*



**Abstract.** The theoretical justification of applying sounding with differential array for detection of local geoelectrical inhomogeneities of medium is provided. The case study of condition of a soil hydraulic engineering construction and upper parts of the geological section in the area of groundwater pollution demonstrates the efficiency of combining of the vertical and differential sounding in resolving engineering-geological and geoecological problems.

**Keywords:** differential array, vertical and differential sounding, geoelectrical inhomogeneity, potential difference.