

В.А.Шевнин (shevninv@rambler.ru)

Новые возможности метода ВЭЗ - оценка петрофизических параметров грунта.

Этот текст - не статья, просто мнение по поводу нового направления в электроразведке.

Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) является классическим методом геофизики, предложенным братьями Шлюмберже в начале 20 века. В последние 10-15 лет метод перешел в новую фазу своего развития, сменив одномерную модель интерпретации 1D (модель горизонтально слоистой среды) на модели неоднородных сред 2D и 3D. Такой переход потребовал изменения в методике полевых работ (от изолированных и относительно независимых зондирований с логарифмическим шагом разносов к измерениям по профилю (или системе профилей), с заранее размещенной системой электродов с линейным шагом по разносам, и расстоянию между ВЭЗ равному, или кратному, этому шагу). Специально для новой методике во многих странах мира была разработана новая аппаратура. Эта методика получила названия: Resistivity Imaging, - Resistivity Tomography, сплошные зондирования и т.д. К этому моменту была разработана теория решения прямых 2D и 3D задач метода сопротивлений, и начали появляться алгоритмы решения обратных задач. Наиболее заметным и широко используемым в мире алгоритмом инверсии стал алгоритм Локе и Баркера (Loke у Barker, 1995, 1996) и программа Локе Res2DInv.

Результатом работы программы Res2DInv является преобразование разреза кажущихся сопротивлений как единой матрицы исходных данных (Рис.1, А) в разрез истинных сопротивлений в функции глубины, причем число слоев и их мощности являются фиксированными для всех точек профиля и площади работ (Рис. 1, В). Такая модель очень удобна для построения карт истинных сопротивлений на разных глубинах, или карт сопротивлений внутри отдельных слоев, когда такие слои можно опознать на разрезах. Фактически работа на некотором участке по системе профилей дает возможность создать куб данных (Рис. 2) и далее работать с ним по аналогии с кубом данных в сейсморазведке или GPR.

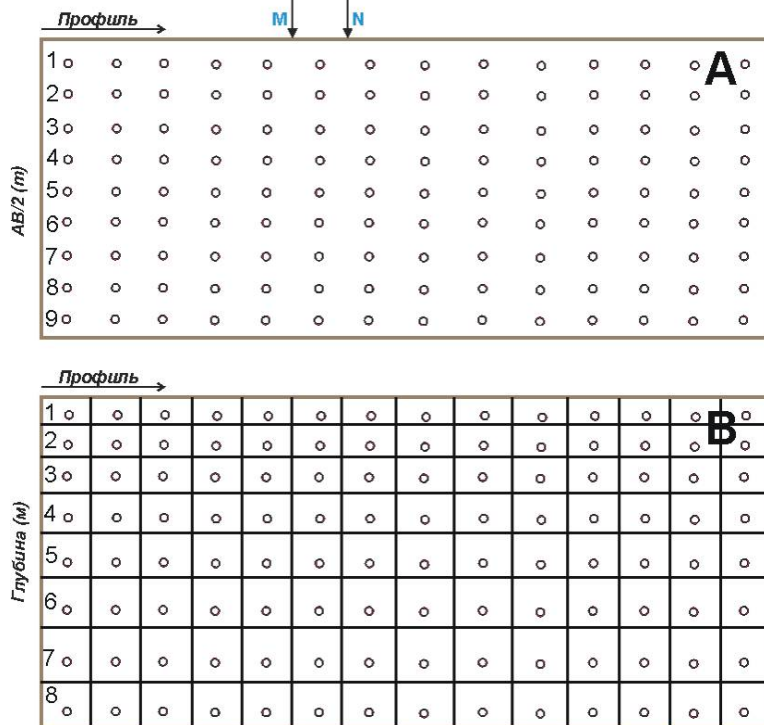


Рис 1: А - разрез кажущихся сопротивлений для одного профиля, измеренного по методике 2D; В - разрез истинных сопротивлений, полученный после интерпретации программой RES2DINV и преобразования программой X2IP1.

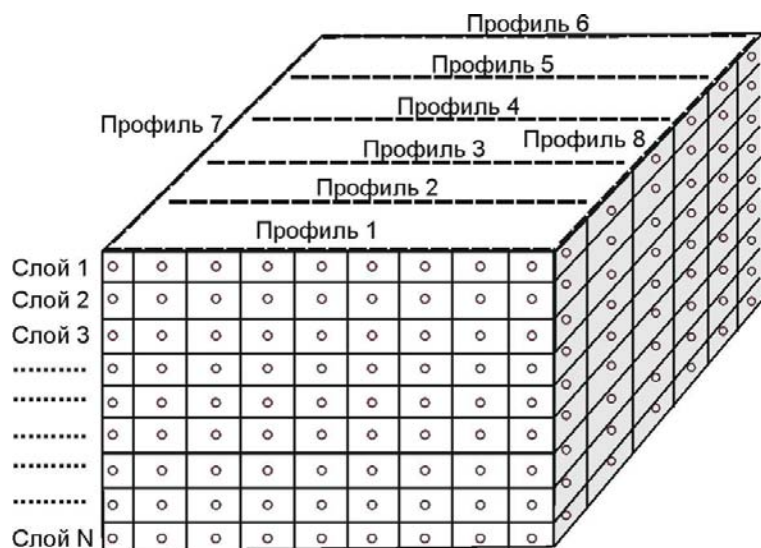
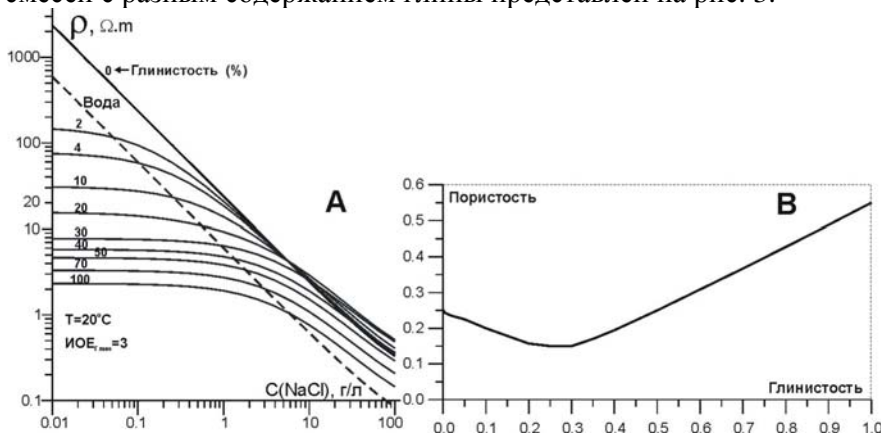


Рис. 2: Куб данных, получаемый при интерпретации с RES2DINV разных профилей ВЭЗ на одной площади.

После интерпретации с Res2DInv данные можно преобразовать к формату IPI с помощью программы X2IPI (Bobachev, 2003), а затем, с помощью программы IPI2Win (Bobachev, 1994) преобразовать интерпретационный разрез к формату SURFER. Вообще говоря, программа Res2DInv также имеет возможность сохранения результатов интерпретации в формате SURFER.

Однако интерпретация результатов в рамках моделей 1D, 2D или 3D дает модели сопротивлений среды (понятные геофизикам, но не слишком понятные геологам разных специальностей). Следующим, очень важным шагом в развитии метода ВЭЗ, стала возможность преобразования разрезов и карт сопротивлений в разрезы и карты петрофизических параметров: (глинистости, пористости, ионно-обменной емкости, коэффициента фильтрации), чтобы говорить со специалистами разных геологических направлений на их языке. Алгоритмы такого преобразования были разработаны Рыжовым (и для коэффициента фильтрации совместно с ним) (Рыжов, 1987; Рыжов, Судоплатов, 1990; Shevnin et al., 2004, 2005). Еще в 80 годы Рыжов разработал алгоритм прямой задачи геофизики (расчет сопротивления среды для разных песчано-глинистых моделей) и в конце 2003 года алгоритм обратной задачи - пересчета сопротивлений среды (зная соленость поровой влаги) в петрофизические параметры, перечисленные выше.

Пример решения прямой задачи - расчета сопротивлений как функции солености влаги для смесей с разным содержанием глины представлен на рис. 3.



Фигура 3. А - Палетка теоретических кривых сопротивления от солености поровой влаги (для песчано - глинистых грунтов); В - Зависимость пористости песчано-глинистой смеси от глинистости.

На кривых на рис.3, А указано содержание глины - от чистых песков (вверху) до чистых глин (внизу). Опираясь на такую палетку, зная сопротивление песчано-глинистой смеси и соленость подземных вод можно найти глинистость породы, а по глинистости, с помощью другого графика (Рис. 3, В) определить пористость породы.

Однако палетка на рис. 3, А не является единственной. Кривые для песчано-глинистых смесей располагаются между двумя крайними линиями песка и глины, но положение последних зависит от пористости песка (Рис. 4, вверху) и ионно-обменной емкости глины (Рис. 4, внизу), при их смещении меняют свое положение и все промежуточные линии. Поэтому для определения петрофизических параметров использование палеток неудобно и следует использовать решение обратной задачи. Такая инверсия была реализована Рыжовым в виде программ ПрофВЭЗ и Изоплан.

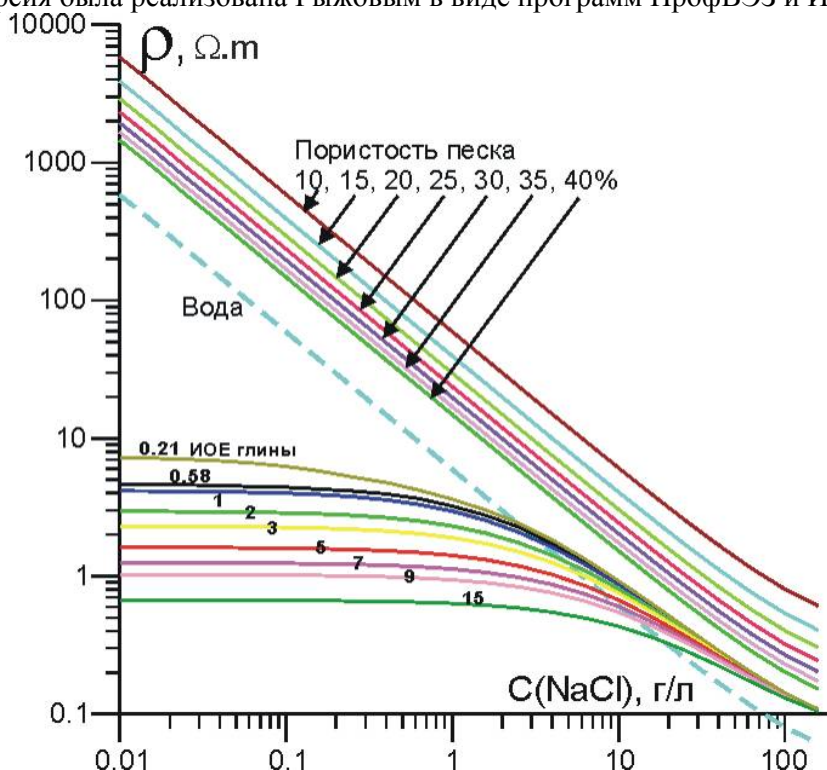


Рис 4. Изменение положения линии песка (вверху) в зависимости от пористости и линии глины (внизу) в зависимости от ионно-обменной емкости глины.

Практика пересчета результатов метода сопротивлений в петрофизические параметры показала, что для чистых грунтов петрофизические параметры получаются близкими к значениям параметров, определенных геологическими и химическими методами. Для грунтов, загрязненных нефтепродуктами, в местах загрязнений петрофизические параметры оказываются аномальными, и их значения следует рассматривать как кажущиеся, но эти аномалии петрофизических параметров очень удобны для локализации загрязнений, так как контраст аномалий для петрофизических параметров оказывается выше, чем для исходных полей сопротивлений (преобразование сопротивления в петрофизические параметры нелинейно). Реальной причиной аномальных петрофизических параметров и аномально низких сопротивлений в местах "зрелых" нефтяных загрязнений является рост поверхностной проводимости в капиллярах загрязненных грунтов при отсутствии изменений или незначительном увеличении электролитической проводимости в тех же капиллярах, как было установлено в работе Abdel Aal et al., 2004.

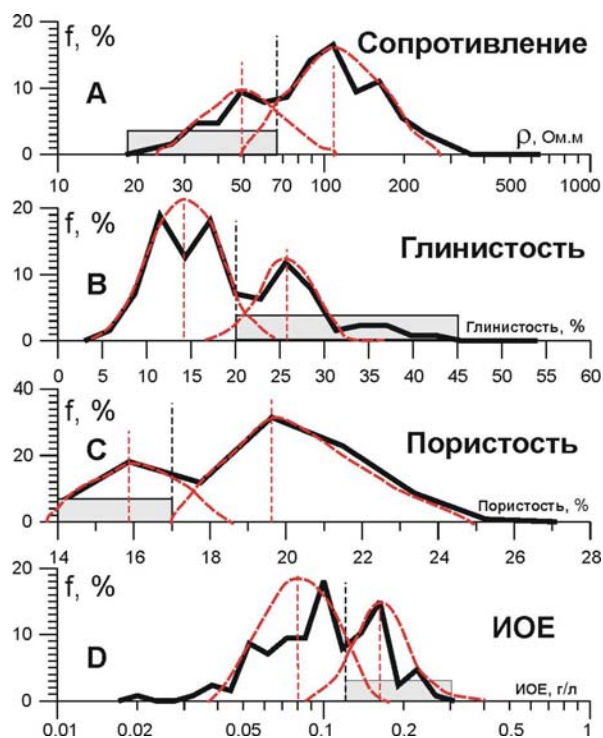


Рис 5. Гистограммы сопротивлений (А) и петрофизических параметров (В-Д). Серые прямоугольники обозначают интервалы аномальных значений для загрязненных грунтов.

На рис. 5 показаны гистограммы для одного участка загрязнения Км124. Различия на гистограммах для незагрязненных и загрязненных участков более очевидны для петрофизических параметров (глинистости и пористости), чем для сопротивления. Были рассчитаны показатели различия между максимумами для чистых и загрязненных грунтов, как разница между максимумами, деленная на стандарт, используя формулу $(\Delta X/\text{std})$. Для сопротивления это значение составило 2.52, для глинистости - 4.36, для пористости - 3.02, и для ИОЕ - 2.46. Максимальное разрешение по этому критерию получено для глинистости и пористости.

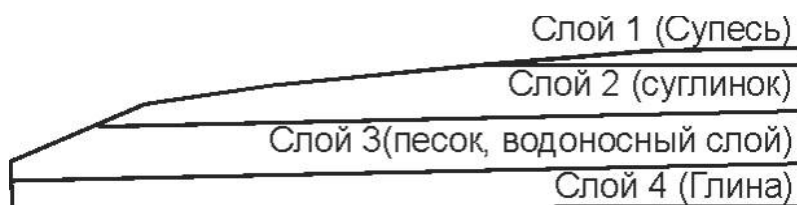


Рис.6. Схематический геологический разрез для участка работ Км42. Физические свойства пород каждого слоя показаны ниже в таблице.

Слой	УЭС	Глинистость	Пористость	ИОЕ	Кф (м/сут)
Супесь (Сара 1)	54	14	19	8	0.02
Суглинок (Сара 2)	30	23	14.6	14	0.005-0.01
Песок (Сара 3)	280	2	24.5	1.2	1-2.65
Глина (Сара 4)	10	59	32	34	0.0006

В качестве примера применения петрофизических расчетов рассмотрим участок работ Км42. В разрезе представлено 4 слоя (Рис.6). Мощность первого слоя не превышает 1 м, мощность второго до 2.5 м, третьего - 2.5 м.

Слои хорошо видны на геоэлектрическом и петрофизических разрезах (Рис. 7). Всего на участке было сделано 6 параллельных профилей для локализации нефтяного загрязнения, произошедшего за 10 месяцев до съемки.

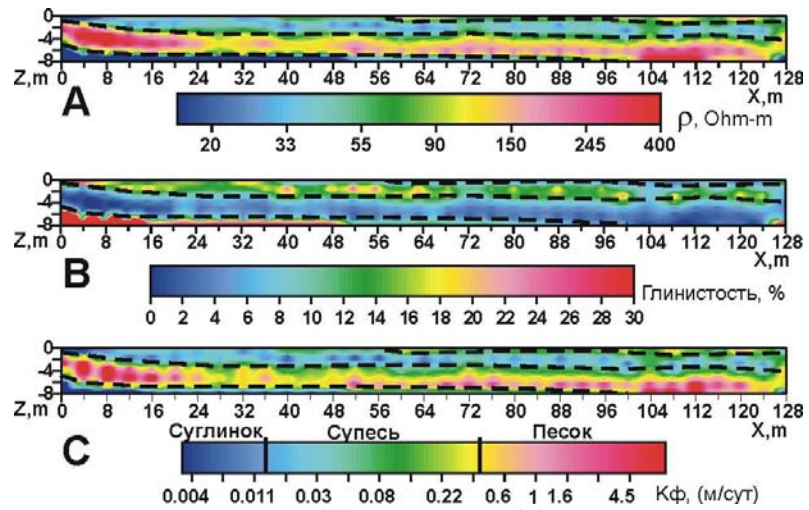


Рис. 7. Разрезы истинных сопротивлений (А), глинистости (В) и коэффициента фильтрации (С).

На этом участке обнаружено слабое загрязнение водоносного слоя нефтепродуктами. Чтобы увидеть загрязнение внутри водоносного слоя, были построены карты сопротивлений и петрофизических параметров именно для этого слоя (Рис.8).

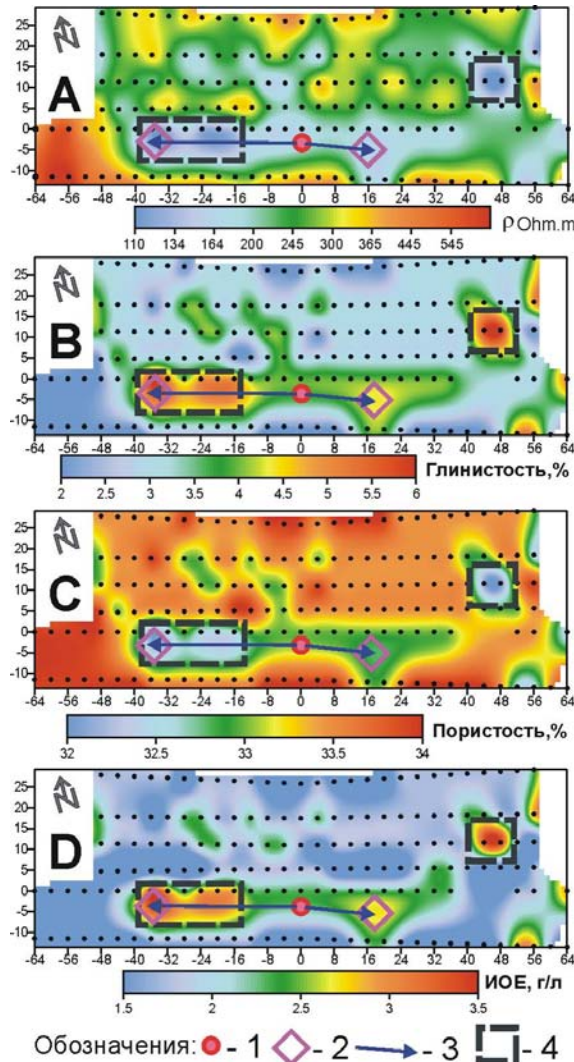


Рис. 8: Серия карт для водоносного слоя: (А) сопротивление, (В) глинистость, (С) пористость у (D) ионообменная емкость. Участок Км42. 1 - место аварии нефтепровода, 2 - гидрогеологические окна в перекрывающем суглинке, 3 направление миграции загрязнения, 4 - зоны загрязнения.

В местах загрязнения водоносного слоя на Рис.8 выявлена аномалия пониженного сопротивления, увеличение глинистости и ионообменной емкости и уменьшение пористости. Эти изменения по своему направлению и амплитуде похожи на изменения, зафиксированные в лабораторном реакторе (Рис.9), в котором в течение нескольких месяцев проводились измерения сопротивления грунта, а до загрязнения и после биодеградации был проведен петрофизический анализ песка по методике Рыжова (Shevnin et al., 2004).

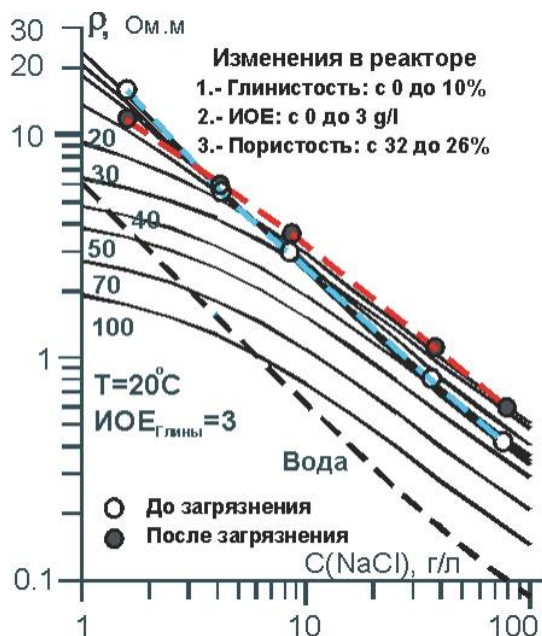


Рис. 9. Результаты петрофизической интерпретации образцов песка из реактора до загрязнения и после биодеградации нефтепродуктов.

Результаты изменений свойств песка до загрязнения и после биодеградации в реакторе в таблице сопоставлены с изменениями в водоносном слое (Рис.8).

Таблица 2. Сравнение изменений свойств песка, загрязненного в поле и в реакторе

Параметр	Место	Чистый песок	Загрязненный	Изменение
Глинистость, %	Км42	2	5-6	Увеличение
	Реактор	0	10	Увеличение
Пористость, %	Км42	34	32	Уменьшение
	Реактор	32	26	Уменьшение
ИОЕ, г/л	Км42	1.5	3-3.5	Увеличение
	Реактор	0	3	Увеличение

Еще один пример использования петрофизических параметров для локализации загрязнения приведен на рис.10 для участка работ Мекатепек. С помощью электромагнитного профилирования и последующей детализации с помощью ВЭЗ были выявлены две зоны загрязнения, занимающие площадь около 700 кв. метров на участке площадью 6 гектаров, локализация - 80 раз. Если изучать всю исходную площадь с помощью бурения и геохимического опробования, то потребуется более сотни проб и стоимость будет в несколько раз выше, чем от применения геофизики.

Есть положительные результаты пересчета в петрофизические параметры результатов электромагнитного профилирования (в этом случае используется кажущееся, а не истинное сопротивление, что, строго говоря, не вполне корректно).

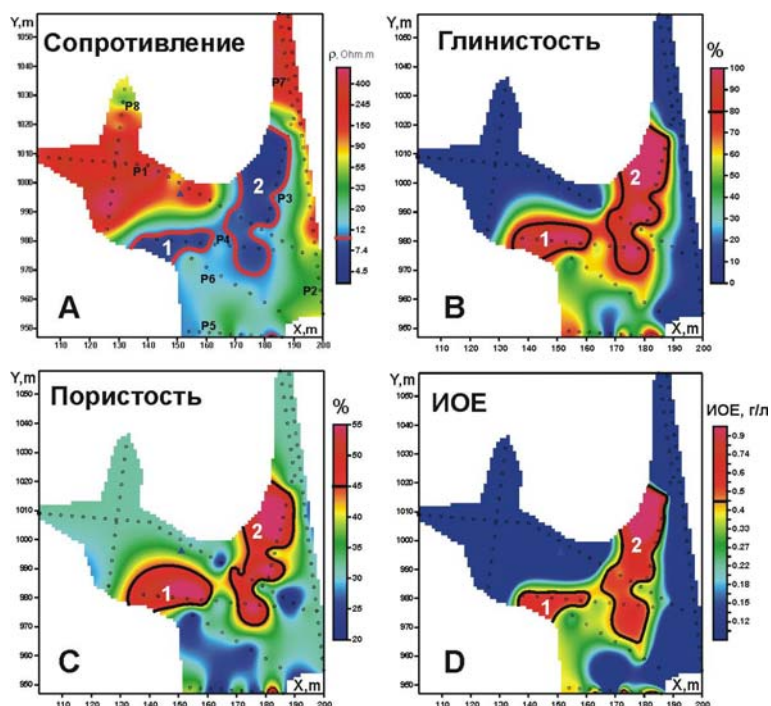


Рис. 8. Карты сопротивления (А) и петрофизических параметров: глинистости (В), пористости (С) и ИОЕ (D). Жирные линии, обозначающие границы загрязнения, установлены с помощью петрофизического моделирования по совокупности всех сведений об участке.

Есть возможность (проверенная на практике) проводить такие пересчеты на грунтах с высокой соленостью подземных вод (до 50 г/л), на участках, где соленость меняется с глубиной, в зоне аэрации (при неполной и переменной влажности грунтов).

Некоторые примеры по теме есть в работе (Шевнин и др., 2004) на русском языке.

Выводы

Расчет петрофизических параметров среды по сопротивлению грунта и солености поровой влаги дает возможность более полной геологической характеристики участка, изучаемого методом сопротивлений.

Петрофизические параметры помогают в картировании нефтяных загрязнений, т.к. отличаются более высоким разрешением и более четким различием свойств для чистых и загрязненных грунтов, чем сопротивление.

Работа с петрофизическими параметрами обогащает геофизика практическими знаниями петрофизических параметров и их взаимосвязи с сопротивлением в гораздо большем объеме, чем стандартный учебный курс.

Для справки электронный адрес А.А.Рыжова: Z_ALBERT@dio.ru.

Литература

- Abdel Aal, G. Z.; Atekwana, E. A.; Slater, L. D.; Atekwana, E. A. 2004. Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 31, No. 12, L12505 10.1029/2004GL020030
- Bobachev, A.A., 1994, IPI2Win software: http://geophys.geol.msu.ru/rec_labe.htm .
- Bobachev, A.A., 2003, X2IPI software: <http://geophys.geol.msu.ru/x2ipi/x2ipi.html> .
- Loke, M.H. and Barker, R.D., 1995, Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60, 1682-1690.
- Loke, M.H. and Barker, R. D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.

- Рыжов А.А. Основные закономерности вызванной поляризации горных пород // Применение метода вызванной поляризации при поисках месторождений полезных ископаемых. М., изд. МГРИ, 1987. С. 5-23.
- Rylov, A. y Shevnin, V., 2002: Theoretical calculation of rocks electrical resistivity and some examples of algorithm's application. *In* Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.
- Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно-технические достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М., 1990. С. 27-41.
- Shevnin V., Delgado Rodríguez O., Mousatov A., Rylov A., 2004, Soil resistivity measurements for clay content estimation and its application for petroleum contamination study. SAGEEP-2004, Colorado Springs. p. 396-408.
- Shevnin V., Delgado Rodriguez O., Mousatov A., Zegarra Martinez H., Ochoa Valdes J. and Rylov A., 2005, Study Of Petroleum Contaminated Sites In Mexico With Resistivity And EM Methods. SAGEEP Proceedings, Atlanta, Georgia, pp.167-176.
- Шевнин В.А., Делгадо О., Рыжов А.А. Картирование методом сопротивлений нефтяных загрязнений геологической среды. Разведка и Охрана Недр, 2004, N 5, С. 27 – 32.