

В.А. Шевнин (vshevnin@imp.mx), О. Делгадо, А.А. Рыжов (Z_ALBERT@dio.ru)

Картирование методом сопротивлений нефтяных загрязнений геологической среды.

Метод сопротивлений применяют для изучения зон нефтяных загрязнений, наряду с другими электрическими (ЕП, ВП) и электромагнитными (ДЭМП, ЗСБ, Георадар) методами. Существует мнение, что нефтяные загрязнения должны давать аномалии повышенного сопротивления на основании того, что нефть и ее продукты обладают очень высоким сопротивлением. Существует и противоположное мнение, что нефтяные загрязнения создают аномалии низкого сопротивления благодаря тому, что нефтепродукты на малых глубинах подвергаются воздействию бактерий. Деятельность бактерий сопровождается рядом физических и химических процессов придающих загрязненной зоне сопротивление более низкое, чем у незагрязненной среды. Среди изменений происходящих под влиянием бактерий следует отметить появление в зоне реакции неорганических и органических кислот, их реакции с минеральными зёрнами грунта (выщелачивание и растворение), увеличение общего количества растворенных солей в поровой влаге, рост концентрации поверхностно-активных веществ (продуктов активности бактерий). Более подробно изменения в зоне загрязнения охарактеризованы в работах W.Sauck (1988), E.Ateqwana и др. (2001, 2003). Авторы в своей практике сталкивались чаще с аномалиями низкого сопротивления в зонах нефтяных загрязнений (1997 - 2004).

Мы делим нефтяные загрязнения по их происхождению на однократные, возникшие в результате единичной утечки нефтепродуктов, разлива, разрыва нефтепровода и т.п.; и многократные, действующие в течение нескольких лет (или десятилетий) на стационарных предприятиях нефтяной промышленности. Последние значительно сильнее проявляются в геофизических полях. Однократные загрязнения в первый момент, вероятно, создают аномалии повышенного сопротивления, но в результате биодegradации (воздействия бактерий) уже через несколько месяцев в местах загрязнений появляются аномалии низкого сопротивления. Загрязнения проявляются на фоне естественного геоэлектрического разреза, где изменения электрических свойств вызваны сменой литологии пород, влажности, пористости. Поэтому для картирования загрязнений важно знать характеристики незагрязненных пород. Для получения такой информации важно вести картирование в зоне, захватывающей как область загрязнения, так область незагрязненных пород. Кроме того, электрическое сопротивление пород закономерно формируется сочетанием разных природных факторов (минерализация подземных вод, глубина уровня грунтовых вод) и характеристик пород (литология, пористость) что можно учесть с помощью петрофизического моделирования или изучения свойств образцов.

Загрязнение можно рассматривать как некий объект, имеющий размеры в плане и по глубине, отличающийся по свойствам от незагрязненной вмещающей среды и меняющий свои свойства в пределах объема загрязнения. Для характеристики такого объекта хорошо подходит метод сопротивлений в модификации томографического зондирования, позволяющий проследить объект на детальных вертикальных двумерных разрезах. Система профилей, пересекающих и охватывающих зону загрязнения позволяет представлять результаты и в виде горизонтальных (или близких к ним) сечений и тем самым характеризовать объект в плане. Изменения свойств в пределах зоны загрязнения помогают выявить местоположение источников загрязнения, путей миграции, подойти к расчету объема пород подвергшегося загрязнению и общего количества загрязнителя, и тем самым подготовить данные для ремедиации (очистки) зоны загрязнения. Высокая чувствительность метода сопротивлений к изменениям физических свойств во времени (мониторинг) может обеспечить контроль за очисткой участка. Способность метода сопротивлений оценивать глинистость грунта позволяет характеризовать защитные свойства водоупоров и степень защищенности от загрязнения водоносных слоев, что, в

общем случае, можно делать и до возникновения загрязнений, составляя карты геологических рисков в условиях промышленной нагрузки на геологическую среду.

Простейшим способом выявления загрязнений по нашему опыту является статистический анализ данных ВЭЗ.

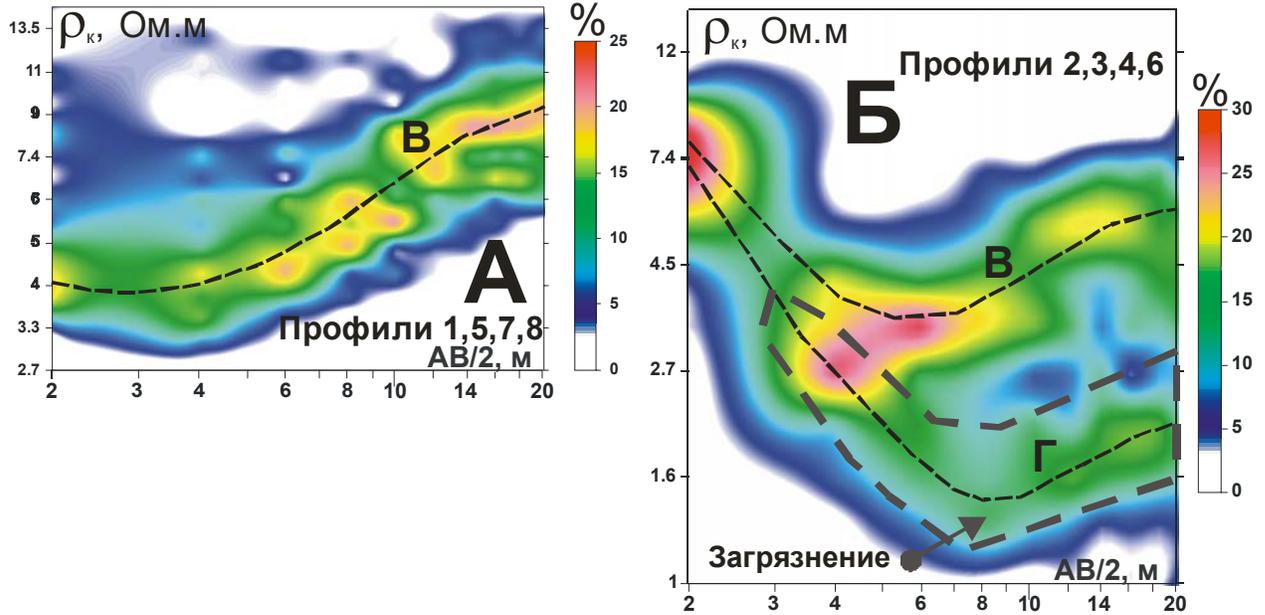


Рис.1. Результаты статистического анализа данных ВЭЗ в виде распределения плотности вероятности значений кажущегося сопротивления для группы профилей вне загрязнения (А) и профилей, пересекающих зону загрязнения (Б). Кривая В отражает фоновый геологический разрез без загрязнения, а кривая Г – указывает на наличие загрязнения.

Достоинством этого метода является быстрота оценки прямо по величинам кажущегося сопротивления, а недостатком - его успешная применимость лишь в относительно простых геологических условиях и при наличии сильного загрязнения. Можно сказать, что наличие двух зон, как на рисунке 1,Б говорит о явном загрязнении, хотя отсутствие явных признаков загрязнения, как на рис.1,А не гарантирует его отсутствия.

Важным приемом обнаружения загрязнения является петрофизический анализ данных. Под ним мы понимаем моделирование (расчет) сопротивления пород по известным литологии, солености или сопротивлению подземных вод и влажности, используя алгоритм и программу А.Рыжова «Петрофизика», что позволяет рассчитать палетку типа приведенной на рис.2 и определить с ее

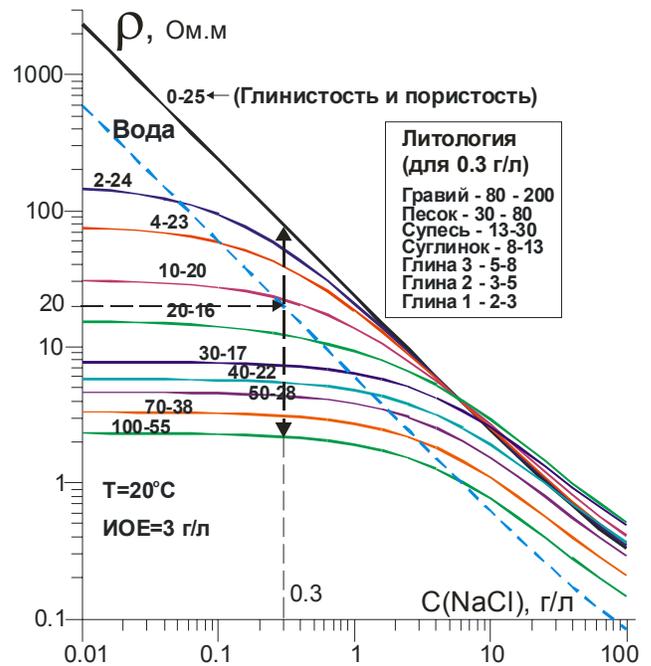


Рис. 2. Теоретическая палетка для песчано - глинистых пород (сопротивление в зависимости от солености поровой влаги)

помощью интервалы сопротивлений для незагрязненных пород. Сопротивления существенно меньшие полученных в данном расчете, мы рассматриваем как признаки загрязнения.

Например, пусть сопротивление подземных вод равно 20 Ом.м. Пересечение горизонтальной линии 20 Ом.м с линией воды позволяет оценить соленость воды 0.3 г/л (в предположении что основная соль NaCl). Если основная соль подземных вод иная, то палетка (рис.2) пересчитывается для этой соли. Вертикальная линия, пересекающая все линии пород для солености 0.3 г/л, дает представление об интервале сопротивлений незагрязненных пород от песка до глины и позволяет построить литологическую легенду, когда каждая литологическая разность (пески, супеси, суглинки, легкие, средние и тяжелые глины) имеют свой интервал сопротивлений (рис.2). Такая легенда позволяет выполнять литологическое картирование незагрязненных участков. Так как сопротивление пород отражает содержание глины, то оценка литологии помогает выделить водоупорные и водоносные слои и оценить степень защиты водоносных слоев с помощью вышележащего водоупора. Если же сопротивление пород оказывается ниже 2.3 Ом.м (минимального для глин при данном сопротивлении подземных вод), то мы делаем вывод о наличии загрязнения. Граница в 2.3 Ом.м может рассматриваться как линия внешнего контура загрязнения, отделяющая загрязненные и незагрязненные участки.

Дополнительная информация о допустимом содержании глины (например, содержание глины не превышает 40%) позволяет установить границу незагрязненных и загрязненных пород на уровне 7.5 Ом.м. Если мы не располагаем априорной информацией о максимальном содержании глины, то эту величину можно определить с помощью измерения в лаборатории зависимости сопротивления рыхлых пород от солености воды в 4-5 точках (для интервала солености от 0.5 до 100 г/л с логарифмическим шагом изменения солености). Такие кривые можно проинтерпретировать количественно с помощью программы «Петрофизика», что позволяет оценить пористость, глинистость, ионно-обменную емкость и некоторые другие петрофизические параметры грунта.

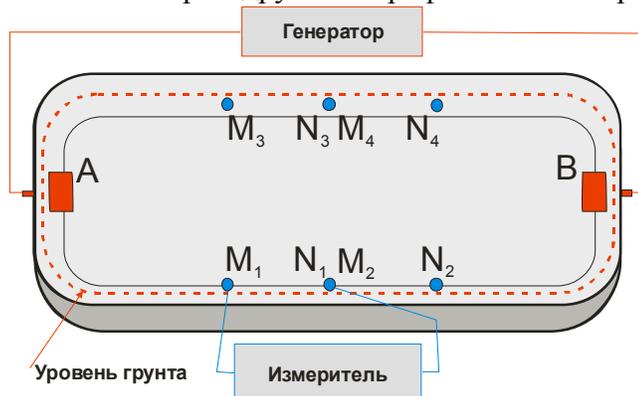


Рис. 3. Резистивиметр для рыхлых грунтов

Для этого нужно взять 5 растворов разной солености и пробу грунта, достаточную для наполнения 5 резистивиметров (объем грунта в резистивиметре от 250 до 700 см³). В каждом резистивиметре грунт насыщается водой своей минерализации. Минерализация воды может контролироваться с помощью водного резистивиметра по зависимости сопротивления воды от ее солености (такая линия приведена на рис.2). Время для подготовки одного цикла измерений пробы грунта в лаборатории составляет от 2 до 4 часов, оно уменьшается при работе с несколькими пробами, а польза от получаемой информации, по нашему мнению, с лихвой оправдывает требуемые затраты времени и сил.

На рис. 4 приведены примеры измерений грунтов, состоящих из смесей чистого мелкозернистого кварцевого песка и бентонитовой (монтмориллонитовой) глины с разным

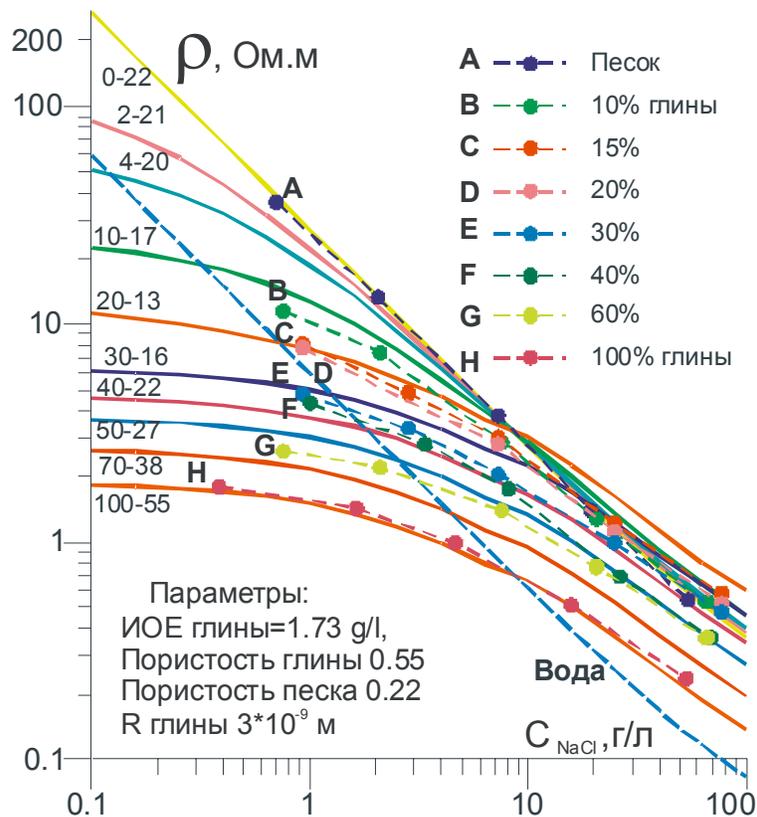


Рис. 4. Измерения сопротивлений грунтов (от чистого песка до глины) при известной концентрации глины.

содержанием глины – 0% (чистый песок), 10, 15, 20, 30, 40, 60 и 100% (чистая глина). Хотя в оценке содержания глины с помощью кривой сопротивления есть некоторые ошибки, литологическая подгруппа определяется точно.

Для характеристики позиции загрязнений в пространстве мы применяем как вертикальные разрезы по профилям, так и карты, получаемые с помощью интерполяции данных между профилями. Томографическая методика зондирования по профилям позволяет применять двумерную интерпретацию данных. Применение двумерной интерпретации данных с использованием программы Локе Res2DInv (Loke, Barker, 1996) позволяет существенно улучшить качество интерпретации и дальнейшую визуализацию результатов по сравнению с одномерной интерпретацией ВЭЗ.

На рис.5 показаны два вертикальных разреза сопротивлений после 2D интерпретации, полученные на разных участках. Общим является наличие загрязнения, существующего несколько десятилетий. В обоих случаях на разрезах виден слой, в котором наиболее сильно проявляется загрязнение. Это слой находится вблизи уровня грунтовых вод. О наличии такого слоя в разрезах с нефтяным загрязнением впервые заявили W.Sauck (1998) и E.Ateqwana и др. (2003). Слой был ими выявлен с помощью вертикального профилирования сопротивлений (VRP), представляющего собой нечто вроде каротажа сопротивлений в скважине и подтвержден анализом популяции нефтяных бактерий и химическими анализами солей в воде. На участке Паредон слой находится на глубине 2-3 метра (в этой местности с большим количеством осадков уровень грунтовых вод расположен неглубоко), на участке Рейноса климат более засушливый и УГВ располагается на глубине около 10 м. Негоризонтальность выделенного слоя связана с тем, что вертикальный разрез отложен от плоской поверхности, хотя реальная дневная поверхность имеет рельеф. По результатам анализа сопротивлений подземных вод, сопротивления и глинистости грунтов и учета литологии пород получены граничные

значения сопротивлений разделяющих участки загрязненные и незагрязненные нефтепродуктами.

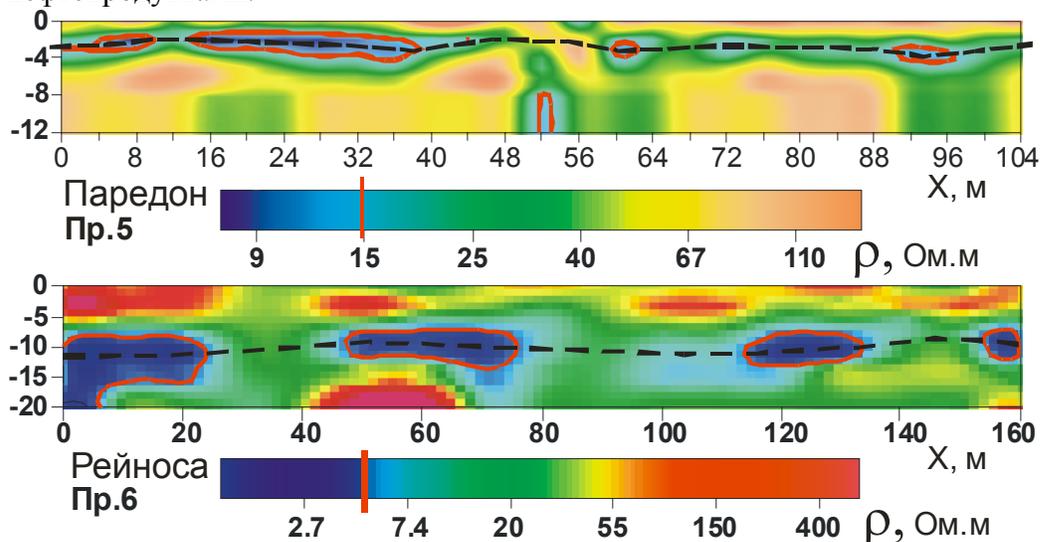


Рис.5. Примеры вертикальных разрезов сопротивлений после 2D интерпретации.

Для локализации загрязнения в плане оказалось наиболее полезно строить карты именно для данного слоя. Примеры таких карт приведены ниже. Рыжовым при дальнейшем развитии алгоритма «Петрофизика» предложен алгоритм пересчета карт и разрезов сопротивлений в карты таких параметров, как глинистость, пористость и ионно-обменная емкость. В местах сильных загрязнений перечисленные параметры дают, возможно, не истинные, а кажущиеся значения, что связано с существенным изменением порового пространства пород загрязнением. Действительно, трудно предположить заметное увеличение глинистости как результат нефтяного загрязнения участка. Просто это эффект, эквивалентный для метода сопротивлений увеличению глинистости. Но карты этих параметров очень структурны и хорошо локализируют зоны загрязнений.

На участке долговременного загрязнения нефтепродуктами (Паредон) были проведены работы методом ВЭЗ (260 зондирований) измерения сопротивления воды (44 замера) и анализ сопротивления грунтов. Загрязнение вызвано нефтяной скважиной, пробуренной в центре участка и работавшей в течение 25 лет, закрытой более 10 лет назад. Загрязнение сосредоточено в основном на территории пруда отстойника в западной части участка. По классической схеме физических изменений в зоне загрязнения, предложенной Sauck (1988) биodeградация нефти приводит к увеличению солености воды и вследствие этого к пониженному сопротивлению воды и грунта. Ateqwana (2003) детально изучая корреляцию сопротивлений подземных вод и грунтов в зоне загрязнения обнаружила, что заметному изменению сопротивления грунта не находится соответствия в сопротивлении подземных вод. Именно такая несогласованность в изменении сопротивлений подземных вод и грунта выявлена нами на участке Паредон. По классической схеме изменения должны следовать стрелке В, а фактически изменения происходят вдоль стрелки Г. На этом же Рис. 6 жирным пунктиром показаны результаты определения глинистости методом сопротивлений на пробе грунта взятой на незагрязненном участке. Эта проба дала 43% глинистости и большей глинистости по мнению геологов на всем участке быть не должно. Тем не менее пары точек сопротивления грунта и воды в зоне Б показывают глинистость достигающую (и даже превышающую) 100%. Этот результат как раз и отражает такие изменения свойств капилляров грунта в зоне загрязнения, которые эквивалентны увеличению глинистости.

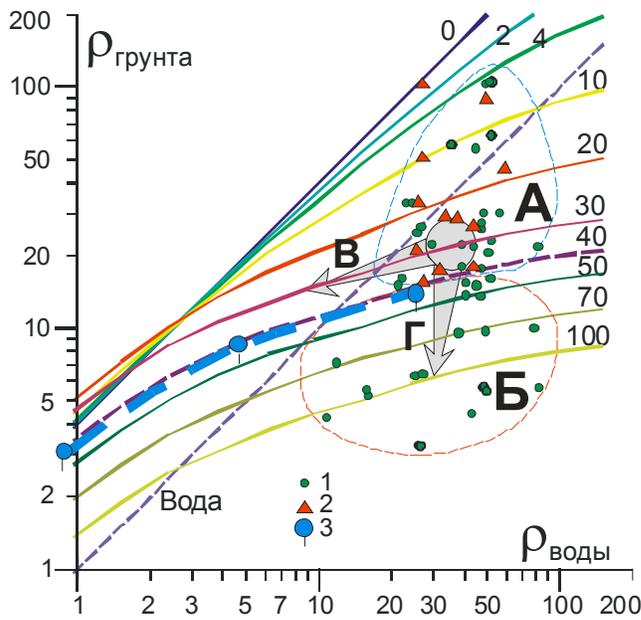


Рис.6. Поле точек сопротивление грунта – сопротивление воды для участка Паредон. Поле А без загрязнения, поле Б – в зоне загрязнения.

На рис.7-9 показаны три карты участка Паредон для слоя вблизи УГВ. Это карты сопротивления (рис.7), глинистости (рис.8) и ионно-обменной емкости (рис.9), полученные из карты сопротивлений с учетом солености подземных вод. Несмотря на некоторые отличия в рисовке аномалий на этих картах они отражают северную и южную аномалии в пределах западной части участка (в пределах пруда-отстойника, показанного пунктиром) и подтвержденные геохимическими данными.

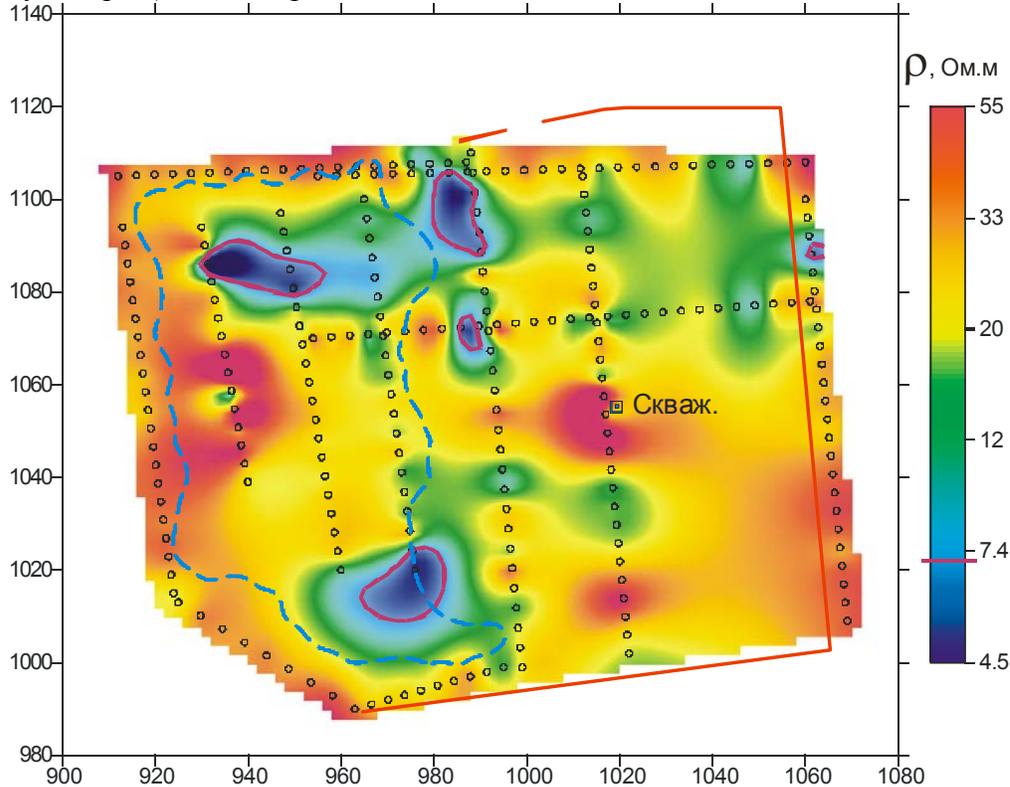


Рис. 7. Карта сопротивлений участка Паредон на глубине УГВ. Кружки показывают точки ВЭЗ на 11 профилях (всего 260 ВЭЗ).

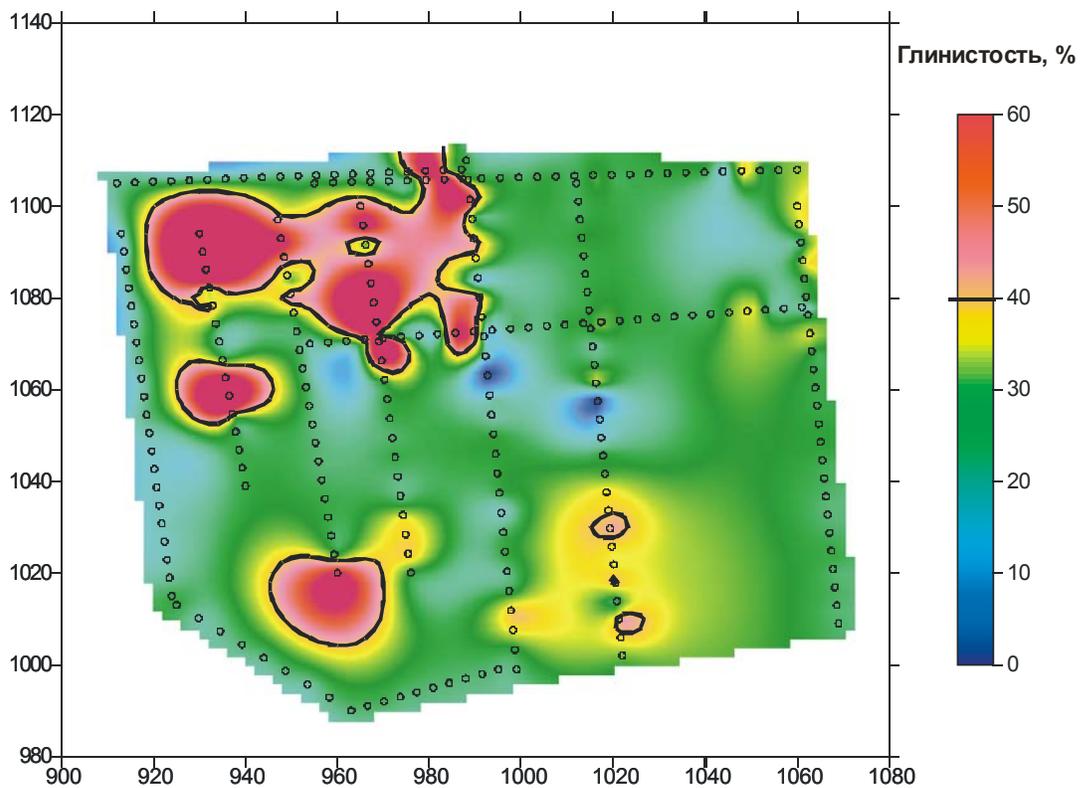


Рис. 8. Карта глинистости участка Паредон на глубине УГВ.

Дополнительной линией на карте глинистости (рис.8) отмечены аномалии глинистости превышающие 40%. По геологическим данным глинистости выше 40% на участке нет, а данные аномалии отражают эффект изменения свойств капилляров грунта в зоне загрязнения, т.е. картируют эту зону.

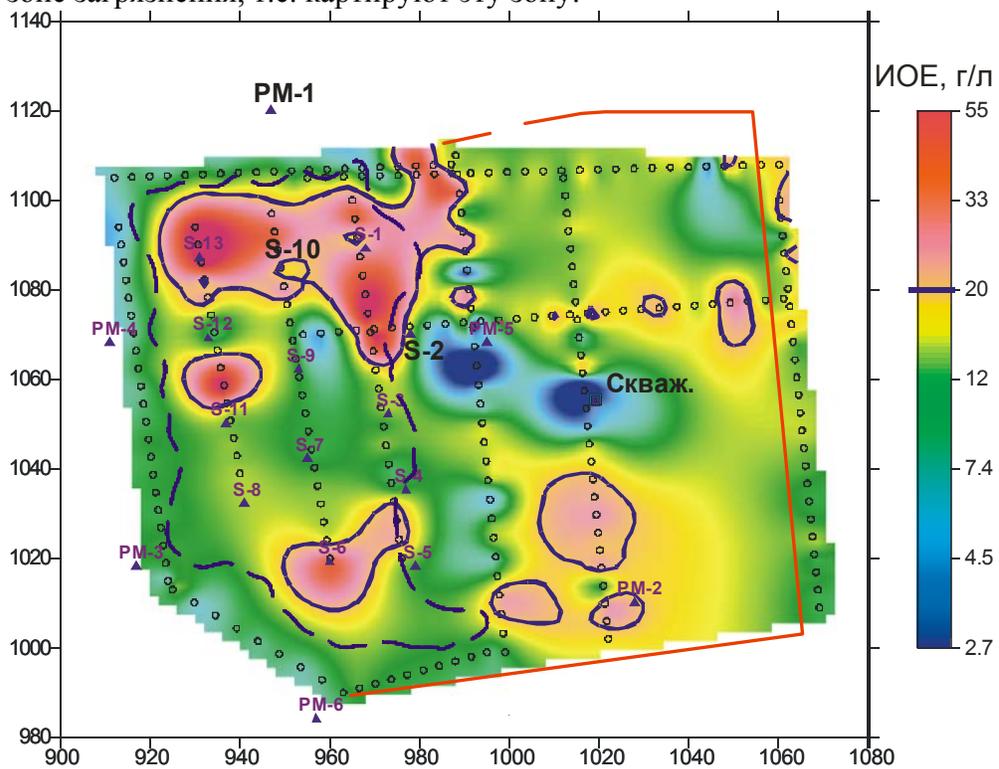


Рис. 9. Карта ионно-обменной емкости участка Паредон на глубине УГВ

На рис.9 приведена карта ионно-обменной емкости участка. Аномалией ИОЕ выше 20 г/л отмечены по существу те же зоны, что и на рис.7 и 8. Эти данные проверены с помощью трех проб грунта, приведенных на рис.10, взятых на участке в точках вблизи РМ-1 (без загрязнения), S-10 (в месте сильного загрязнения) и S-2 (в месте умеренного загрязнения). При интерпретации трех проб грунтов выявлено основное отличие между ними в величине ионно-обменной емкости. ИОЕ равна 0.12 г/л в РМ-1, 21 г/л в S-10 и 8 г/л в S-2. Сопоставление значений ИОЕ найденных по методу сопротивлений и по данным геохимии показано в виде поля корреляции значений на рисунке 10, Г. На наш взгляд корреляция удовлетворительная.

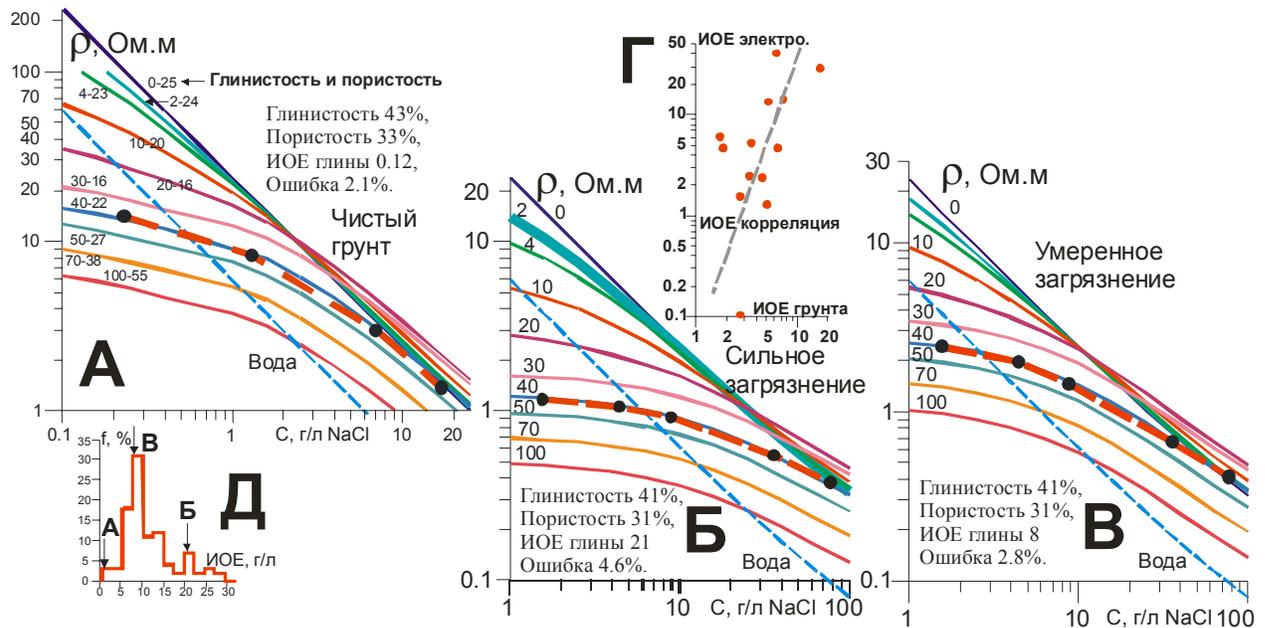


Рис.10. Результаты трех проб грунта с участка Паредон: вне зоны загрязнения (А), в зоне сильного загрязнения (Б) и в зоне умеренного загрязнения (В).

В случае слабых загрязнений петрофизические карты дают истинные или близкие к ним петрофизические параметры. Пример такого расчета показан на рисунке 11 для участка 42 км в сопоставлении с результатами физического исследования процесса биodeградации в лабораторном реакторе. На участке 42 км произошло загрязнение разреза нефтепродуктами в результате разрыва одного из 4 трубопроводов. Место аварии показано красным кружком. На участке на глубине 3 – 5 метров залегает водоносный слой, представленный чистым песком, он перекрыт слоем суглинков (местный водоупор) и подстилается слоем плотных глин. Водоупор содержит лишь около 20% глин, поэтому загрязнение прошло через этот слой и оказалось в водоносном слое. Геофизические работы были проведены через 8 месяцев после аварии. При составлении карт глинистости, пористости и ионно-обменной емкости для водоносного слоя обнаружена аномалия в интервале $X = -16 - -40 \text{ м}$, $Y = -8 - +1 \text{ м}$. В пределах этой аномалии изменения свойств оказались похожи на изменения свойств песка в реакторе. В водоносном слое глинистость возросла с 2 до 6%, пористость уменьшилась с 34 до 32%, ИОЕ возросла с 1 до 3.5 г/л. В реакторе глинистость возросла с 0 до 10%, пористость уменьшилась с 32 до 26%, ИОЕ возросла с 0 до 3 г/л. Еще раз следует заметить, что изменения параметров кажущиеся, в действительности не произошло увеличение глинистости, а произошли изменения в структуре капилляров грунта, вызванные загрязнением, эквивалентные росту глинистости.

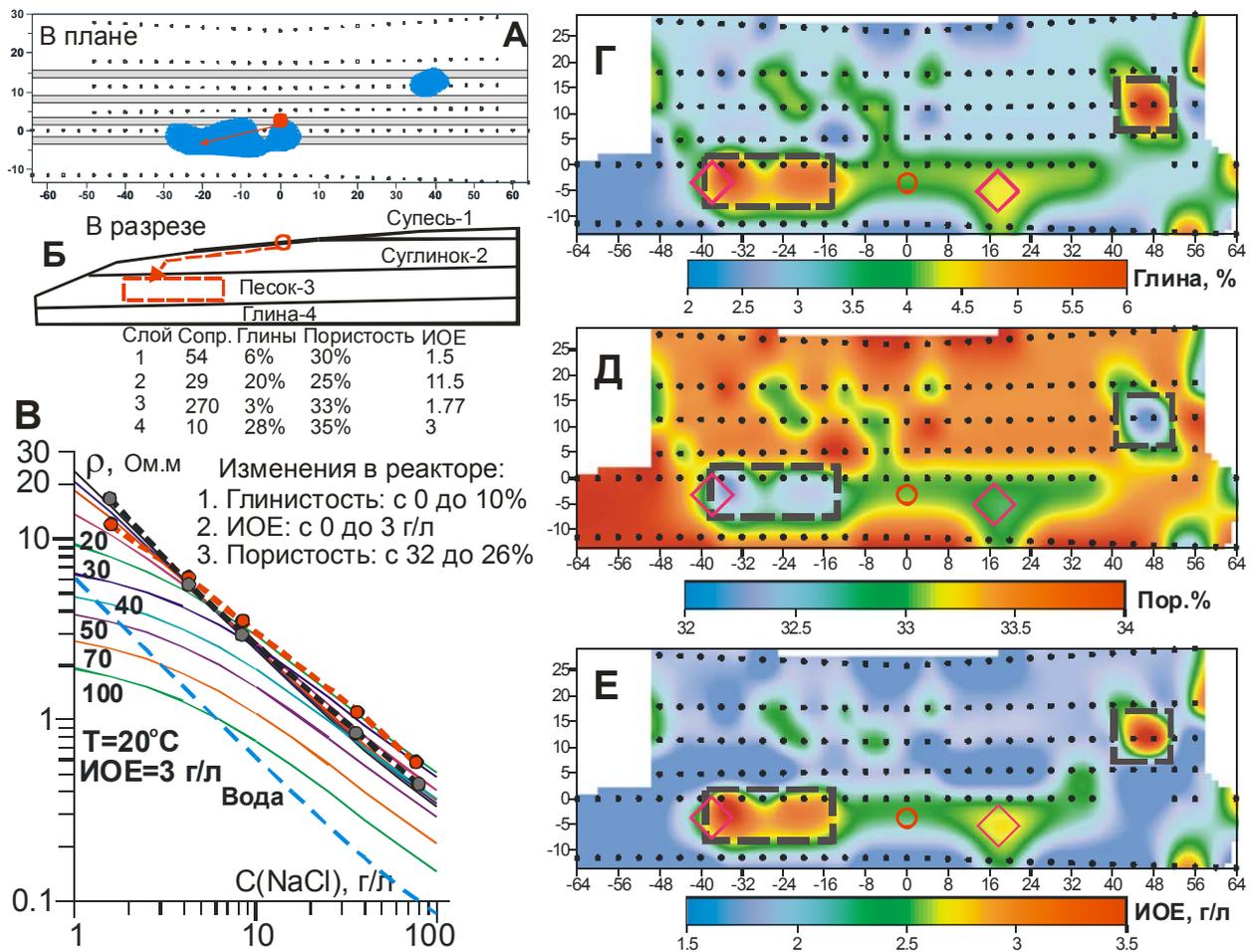


Рис.11. Полевые результаты для участка 42 км в сопоставлении с результатами процесса биодegradации в реакторе. А – План профилей и расположение труб на участке 42 км; Б – схематический разрез участка с 4 слоями; В – результаты интерпретации проб песка исходного и после 4 месяцев в биореакторе; Г – карта глинистости для водоносного слоя;

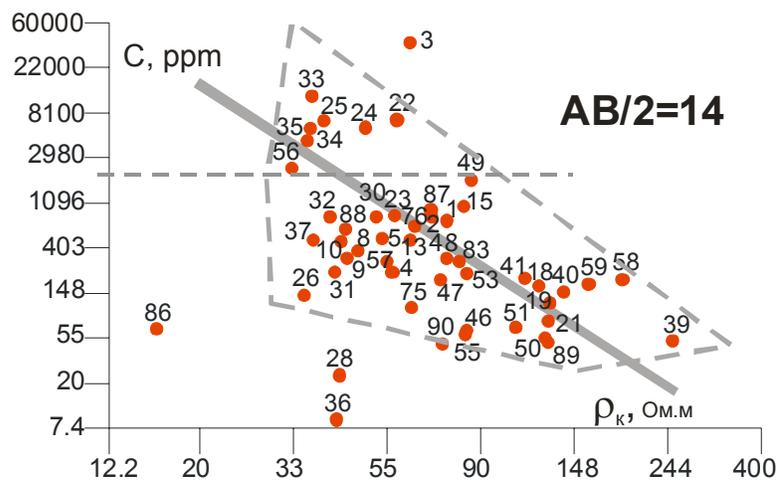


Рис. 12. Корреляция значений кажущихся сопротивлений (для $\text{AB}/2=14 \text{ м}$) и степени загрязнения грунта по данным геохимии.

Д – карта пористости для того же слоя; Е - карта ионно - обменной емкости.

При изучении зон нефтяных загрязнений часто возникает вопрос, а отражают ли геофизические параметры степень загрязнения? На рис.12 приведена корреляция между значениями кажущихся сопротивлений для разноса $AB/2=14$ м и общим количеством углеводородов, определенным по данным геохимии. Получена достаточно уверенная корреляция этих значений в интервале от 20 ppm (миллионных весовых частей) – это незначительное загрязнение, до 20000 ppm (сильное загрязнение).

Выводы

1. Метод сопротивлений в модификации ВЭЗ позволяет изучать нефтяные загрязнения в плане и по глубине.
2. Измерения сопротивления подземных вод и грунтов дают полезную дополнительную информацию для интерпретации вертикальных электрических зондирований. Для подобных измерений требуются лишь водные и грунтовые резистивиметры. Измерения с грунтовыми резистивиметрами осуществляются для 4-5 разных соленостей воды и позволяют оценить глинистость, пористость и ионно-обменную емкость грунтов.
3. Знание петрофизических параметров грунтов позволяет более надежно и содержательно провести интерпретацию данных ВЭЗ при изучении нефтяных загрязнений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Геофизические методы экологического обследования предприятий нефтяной промышленности. 1999 г. Изд. «Руссо», 511 с. Редакторы: Модин И.Н., Шевнин В.А.
2. Рыжов А.А. 1987. Основные закономерности вызванной поляризации горных пород // Применение метода вызванной поляризации при поисках месторождений полезных ископаемых. М., изд. МГРИ, с. 5-23.
3. Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. 1990. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач // Научно - техн. достижения и передовой опыт в области геологии и разведки недр. М., с. 27-41.
4. Atekwana, E. A., Cassidy, D. P., Magnuson, C., Endres, A. L., Werkema, D. D., Jr., Sauck, W. A. 2001. Changes in geoelectrical properties accompanying microbial degradation of LNAPL. SAGEEP Proceedings, OCS1, 10 pp.
5. Atekwana, E. A., Atekwana, E. A., Rowe, R. S., 2003. Relationship Between Total Dissolved Solids and Bulk Conductivity at a Hydrocarbon-Contaminated Aquifer. SAGEEP Proceedings, pp. 228-237.
6. Delgado O., Shevnin V. 2002. Application of resistivity sounding method for oil pollution study in urban and rural areas. SAGEEP Proceedings, 10 p.
7. 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.
8. Modin I.N., Shevnin V.A. et al., 1997. Investigations of oil pollution with electrical prospecting methods. Proceedings of the 3rd EEGS-ES Meeting. Aarhus, Denmark, 8-11 September 1997. P.267-270.
9. Ryjov, A. and Shevnin, V., 2002. Theoretical calculation of rocks electrical resistivity and some examples of algorithm's application. SAGEEP Proceedings, 10 pp.
10. Sauck W. A. 1998. A conceptual model for the geoelectrical response of LNAPL plumes in granular sediments. SAGEEP Proceedings, pp. 805-817.
11. Shevnin, V., Ryjov, A., Nakamura E., Sanchez A., Korolev V., Mousatov A., 2002. Study of oil pollution in Mexico with resistivity sounding, SAGEEP Proceedings, 10 pp.
12. Shevnin V., Mousatov A., Delgado-Rodríguez O., Nakamura-Labastida E., Mejía-Aguilar A.

- Sanchez-Osio J.-L., Sanchez-Osio H., 2003. Study of oil pollution in airports with resistivity sounding. Proceedings of SAGEEP-2003, 10 pp. CON03, pp.180-189
13. Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A., Nakamura-Labastida, E. and Mejía-Aguilar, A., 2003. Oil pollution detection with resistivity sounding. *Geofísica Internacional*. Vol. 42, N 4, pp. 613-622.
14. Shevnin V., Delgado Rodríguez O., Mousatov A., Ryjov A., 2004. Soil resistivity measurements for clay content estimation and its application for petroleum contamination study. SAGEEP Proceedings, 13 pp.