

Введение

Работы проводились на участке канала Байе дель Фуэрте дающего воду для нужд местного населения и сельского хозяйства. Цель исследования состояла в изучении характеристик грунтов данного участка для определения их фильтрационных свойств.

Вдоль русла канала было намечено 7 ключевых участков, на каждом из которых был пройден короткий профиль из 11 вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ), пробурено по три скважины до глубины 4 м (всего 21 скважина), и отобраны образцы грунта для определения их различных характеристик в лаборатории (по 3-4 пробы в каждой скважине) (73 пробы). Были взяты пробы подземных вод (21 шт.) для определения общей минерализации, ионного состава, электропроводности, рН. В пробах определялись состав грунта (процент частиц песка, алеврита и глины) (73 образца), пористость (25), коэффициент фильтрации (73), ионообменная емкость (73). Часть каждой пробы поступала на измерение сопротивления грунта при 4-5 разных соленостях насыщающей влаги (73), по методике разработанной в ИМП (Shevnin et al., 2007).

Из катионов в воде преобладает натрий Na^+ , из анионов примерно в равных долях SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- . В изученных по составу 73 образцах грунта относительно мало глины (14%), преобладает алеврит (46%) и песок (40%). Пористость определялась по различию весов полностью водонасыщенного и полностью высушенного образца.

Измерения ИОЕ в лаборатории производят в единицах мг-экв./100 г. В программе Retrowin А.Рыжова при решении как прямой, так и обратной задачи ИОЕ используется в г/л. Условно можно пересчитать единицы ИОЕ деля ИОЕ в мг-экв./100 г на 4 и получить ИОЕ в г/л.

Применение электрических зондирований (электротомографии)

Включение электроразведки ВЭЗ в данные исследования было вызвано тем, что в течение ряда лет А.Рыжовым (Рыжов, Судоплатов, 1990; Рыжов и др., 2006) разрабатывалась теория расчета сопротивления грунта по его геологическим характеристикам и алгоритм оценки геологических характеристик по данным метода сопротивлений (Рыжов и др., 2006). Была создана программа Retrowin, позволяющая проводить различные расчеты в направлении от геологических свойств грунтов к их сопротивлению, так и наоборот - оценивать геологические свойства по сопротивлению и др. характеристикам грунта (Shevnin et al., 2008). Эта методика в течение ряда лет применялась в Мексике на разных объектах, чаще всего на участках нефтяных загрязнений, и показала свою

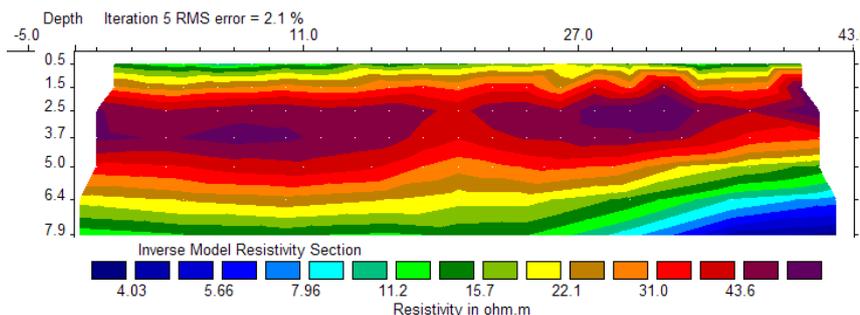


Рис.1. Результат 2D инверсии для профиля 1. Виден разрез типа К.

эффективность (Шевнин и др., 2004). В штате Синалоа также делались попытки применить эту методику примерно с 2003 года, причем менее успешные, чем в других районах Мексики из-за особенностей грунта в Синалоа. Поэтому, получив большой объем геологического материала на участке Байе дель Фуэрте, была сделана еще одна попытка сопоставить его с

данными электроразведки, чему и посвящена настоящая статья. Профильные измерения ВЭЗ были сделаны таким образом, чтобы результаты можно было интерпретировать как с помощью 1D алгоритма, так и использовать 2D инверсию (Loke and Barker, 1996). Для измерений на каждом профиле размещались электроды с постоянным шагом между электродами 2 м и проводились измерения на 11 разносах $AB/2$ от 3 до 21 м при шаге между точками ВЭЗ 4 м.

Рассмотрим методику работы с данными электроразведки на примере профиля 1. Сначала

делались попытки применить эту методику примерно с 2003 года, причем менее успешные, чем в других районах Мексики из-за особенностей грунта в Синалоа. Поэтому, получив большой объем геологического материала на участке Байе дель Фуэрте, была сделана еще одна попытка сопоставить его с

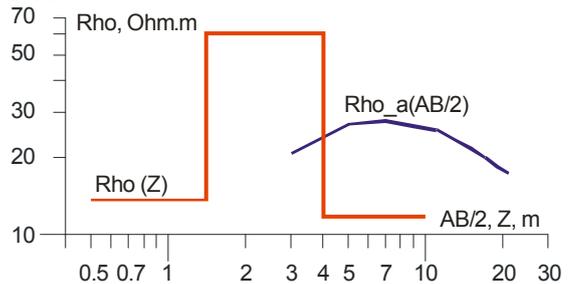


Рис.2. Средняя для профиля 1 кривая ВЭЗ и 1D модель для нее.

выполнялась 2D инверсия (Рис.1). Данный разрез достаточно однородный и горизонтально-слоистый, для него получили среднюю для профиля кривую ВЭЗ и выполнили ее 1D интерпретацию (Рис.2). Используя эту модель как начальное приближение был проинтерпретирован весь профиль (Рис.3,А)

Для пересчета разреза сопротивлений в разрезы других петрофизических параметров нужно знать соленость поровой влаги и модель грунта. Модель грунта определяют после измерений сопротивления грунта при разных соленостях и количественной интерпретации полученной кривой по программе Petrowin, например, как в таблице 1.

Таблица 1

Компонента	Радиус кап.	Пористость	ИОЕ, г/л
Песок	0.500E-04	0.3	0
Глина	0.300E-07	0.65	2.6

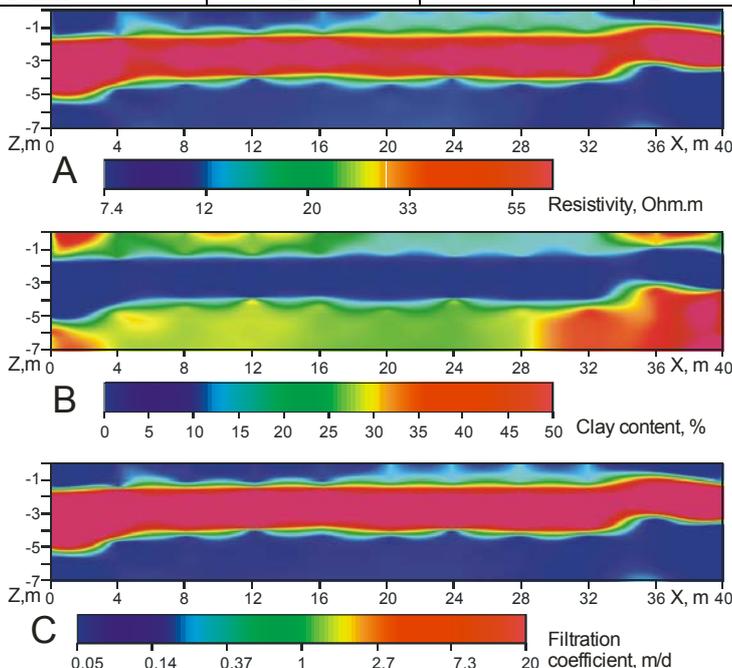


Рис.3. Геоэлектрические разрезы для профиля 1. А – Разрез сопротивлений после 1D интерпретации. В – разрез глинистости; С – разрез коэффициента фильтрации.

Такие кривые интерпретировались количественно по программе Petrowin с оценкой ряда петрофизических параметров грунта (Shevnin et al., 2008). Результаты интерпретации записывают в таблицы параметров грунта, типа таблиц 2 и 3.

Таблица 2

Образец5: b1.9-4	Глинист.	Порист.	ИОЕ	Кф
Экспер.	3			3.08
Интерпр.	5	27.8	0.45	3.08 - 2

Таблица 3

Образец 6: c0-1	Глинист.	Порист.	ИОЕ	Кф
Экспер.	25			0.75
Интерпр.	44	38.4	0.88	0.74 - 0.04

При интерпретации кривых сопротивления грунта от солености влаги, типа показанных на рис. 4, с помощью программы Petrowin вначале вычисляется глинистость образца. Затем для вычисления коэффициента фильтрации используются два разных алгоритма. Первый (предложенный А. Рыжовым на основе капиллярных систем грунта) для вычисления КФ использует формулы (1-2):

Петрофизические параметры (разрезы В и С на рис.3) получены с помощью программы Petrowin по методике А.Рыжова (Shevnin et al., 2008).

Анализ связей петрофизических параметров

На рис. 4 представлены кривые сопротивления грунта от солености влаги для проб грунта из трех скважин на профиле 1. Кривые заметно разделились на две группы. Кривые 2, 5 и 8 соответствуют образцам грунта, взятым из второго слоя – более песчаного, остальные кривые (глубина проб от 0 до 1.4 м) соответствуют приповерхностному слою – более глинистому. До третьего слоя бурение не дошло.

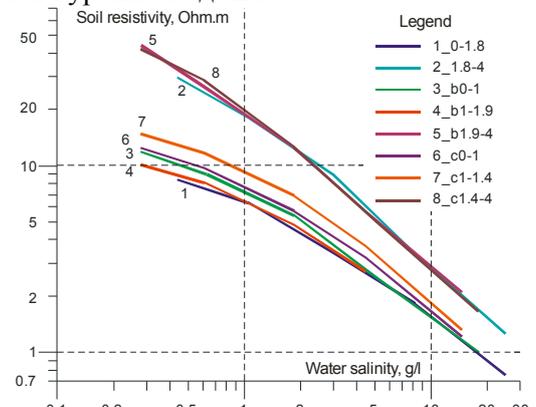


Рис.4. Кривые сопротивления грунта от солености влаги, измеренные в лаборатории. В шифре кривых вписаны порядковый номер, скважина и глубина.

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{f1} = 6.136 \cdot (K_{psef} R_V^2 + C_{clay} K_{pC} R_{clay}^2) \cdot 10^{10}, \\ K_{psef} = K_{pS} - C_{clay} \cdot (1 - K_{pC}), \\ R_V = R_S \cdot \left(1 - \frac{C_{clay}}{K_{pS}} \right) \end{array} \right\}, \text{ при } C_{clay} < K_{pS}, \quad (1)$$

$$K_{f1} = 6,136 \cdot (C_{clay} K_{pC} R_{clay}^2) \cdot 10^{10}, \quad \text{при } C_{clay} > K_{pS} \quad (2)$$

где K_{f1} - коэффициент фильтрации образца; K_{psef} - коэффициент эффективной пористости образца зависящий от степени заполнения пор песка глиной; K_{pS} - коэффициент пористости песка; K_{pC} - коэффициент пористости глины; C_{clay} - объемное содержание глины в образце; R_S - радиус пор песка; R_{clay} - радиус пор глины. Пористость выражена в долях единицы, а радиусы пор в метрах.

Второй алгоритм для вычисления K_{f2} , предложенный В.А. Шевниным (Shevnin et al., 2006), использует статистическую зависимость K_f от глинистости по формуле (3);

$$K_{f2} = 0.0072 \cdot C_{clay}^{-2} \quad (3)$$

При подборе параметров образцов взятых в штате Синалоа определяется глинистость, которая в данном случае дает суммарное содержание тонкой фракции, состоящей из алеврита и глины. Отличие алгоритмов, дающих различные значения K_{f1} и K_{f2} иногда в 2-3 раза отличающиеся друг от друга, практически не существенно, так как даже откачки из одиночных скважин имеют подобный разброс при определениях K_f при сравнении их с результатами определения K_f пород с помощью более точных кустовых откачек. Вопрос, какие значения K_f использовать для характеристики пород, решается сопоставлением полученных с помощью программы Petrowin теоретических параметров с результатами экспериментального определения на образцах.

Такие кривые ρ от солёности были получены для 73 образцов грунта из 21 скважины по всем 7 профилям данного участка. Интегрально эти данные представлены на рис.5.

На рис.5 показано распределение K_f от содержания в образце тонкой фракции (глина + алеврит). Буквой А отмечено скопление точек, хорошо аппроксимируемое формулой Шевнина (3) [Shevnin et al., 2006]; буквой В отмечено отдельное скопление точек с низкими K_f , которое удается аппроксимировать по алгоритму Рыжова (1-2). Надо отметить, что расчеты 1 - 3 обычно выполняют для переменной глинистости, а на рисунке 12 по горизонтальной оси отложено содержание тонкой фракции (глина +

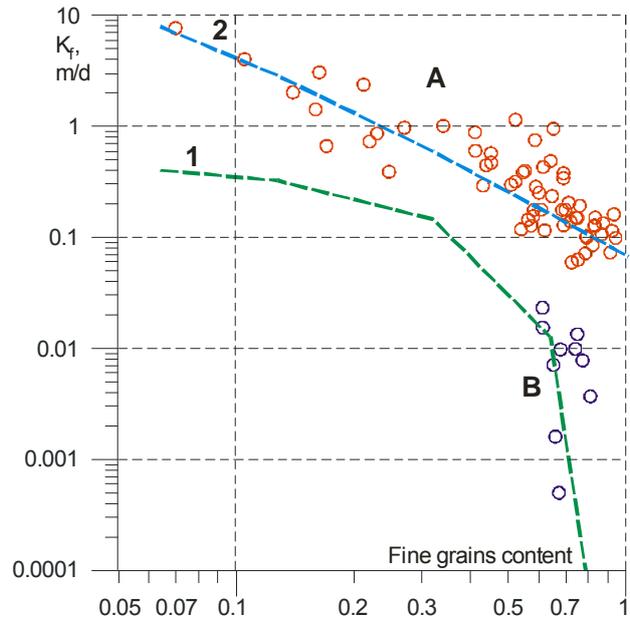


Рис.5. Корреляция измеренных коэффициентов фильтрации и содержания тонкой фракции в грунте. 1 – расчет подобной связи по алгоритму Рыжова, 2 – по эмпирической формуле (3).

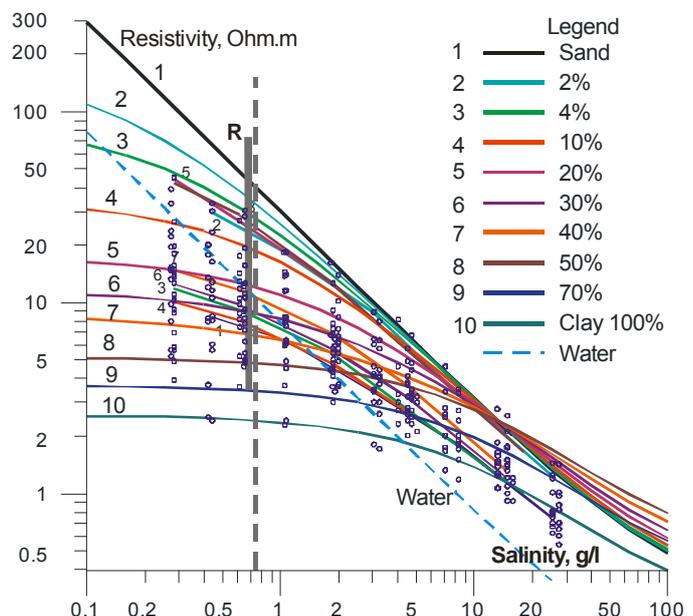


Рис.6. Петрофизическое моделирование.

алеврит). Поэтому графики были смещены по горизонтали, учитывая долю глины в тонкой фракции.

На рис.6 совмещены данные экспериментов и теоретических расчетов. Этот процесс сведения данных на одном рисунке получил название петрофизического моделирования и используется для проверки непротиворечивости всех данных. Синими точками показаны измерения ρ образцов при разных соленостях (в интервале от 0.028 до 30 г/л). Синяя пунктирная кривая показывает сопротивления воды в зависимости от солености. Непрерывные линии разных цветов для солености от 0.1 до 100 г/л - это теоретические расчеты сопротивления грунтов от чистого песка до чистой глины от солености. Вертикальная пунктирная линия это преобладающая соленость подземных вод 0.73 г/л. Для этой солености все экспериментальные измерения сопротивления грунтов и теоретические расчеты оказываются в пределах от 2.5 до 40 Ом.м. Сопротивления по результатам 2D инверсии 7 профилей показаны толстой серой линией R и находятся в интервале от 3.5 до 74 Ом.м. Верхняя часть этой линии выходит за пределы линии песка, потому что верхняя часть грунта участка находится в зоне аэрации (глубина УГВ участка находится на глубине 1.7 м, а на профиле 1 на 1.3 м), а расчеты на рис.14 проведены для условий полного увлажнения. Наклонные линии в интервале соленостей от 0.28 до 15 г/л это кривые сопротивления от солености для профиля 1 (см. рис.4). Относительно хорошее соответствие этих данных говорит о том, что экспериментальные и расчетные данные друг с другом согласованы.

Заключения и выводы

Грунты на участке Байе дель Фуэрте в штате Синалоа представлены в основном алевритовой фракцией (46%), мелкозернистым песком (40%) и небольшим количеством глины (14%). При этом глина может обладать высокой ИОЕ (до 9 г/л или 30-40 mg/100g и более, а для отдельных образцов до 25 г/л). ИОЕ грунта прямо зависит от содержания глины, песок и алеврит имеют низкую ИОЕ.

Соленость воды в основном 0.7-1 г/л, хотя встречаются и минерализованные до 20 г/л воды. Из катионов – преобладает Na, из анионов SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , примерно поровну.

Коэффициент фильтрации грунта был изучен на достаточно большом (73) числе измерений. В основном измеренные значения Кф имеют величину от 0.1 до 10 м/сут с резким уменьшением Кф для глинистых проб от 0.01 до 0.001 и менее м/сут.

Петрофизическое моделирование показало, что экспериментальные и теоретически рассчитанные параметры грунта неплохо соответствуют друг другу и, следовательно, основная цель настоящей работы – понять модель грунта данного участка, достигнута.

Используя электрические зондирования и применяя программу «Petrowin» можно уменьшить в 2-3 раза число отбора образцов для определения петрофизических (пористость и глинистость) и воднофизических (КФ и соленость) свойств пород изучаемого участка, что, соответственно, уменьшит стоимость полевых и лабораторных работ.

Литература

Рыжов А.А., Судоплатов А.Д. Расчет удельной электропроводности песчано-глинистых пород и использование функциональных зависимостей при решении гидрогеологических задач. 1990. // В книге " Науч.-техн. достижения и передовой опыт в области геология и разведка недр: Науч.-техн. информ. сб. / ВНИИ экон. мин. сырья и геол. разв. работ. Москва, с. 27-41.

Рыжов А.А. Шевнин В.А., Делгадо-Родригес О. Оценка петрофизических параметров грунтов по данным метода сопротивлений. 2006. Журнал Геофизика, № 4, с. 37-43.

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.

Loke, M. H. and Barker R. D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophys. Prospect., 44, 131-152.

Shevnin V., Delgado-Rodríguez O., Mousatov A. and Ryjov A. 2006. Estimation of hydraulic conductivity on clay content in soil determined from resistivity data. Geofísica Internacional, Vol. 45, Num. 3, pp. 195-207.

Shevnin V., Mousatov A., Ryjov A. and Delgado-Rodriquez O. Estimation of clay content in soil based on resistivity modelling and laboratory measurements. Geophysical Prospecting, 2007, 55, p.265-275

Shevnin V.A., Mousatov A.A., Ryjov A.A. & Delgado- Rodriguez O., Petrophysical Analysis of Resistivity Data. – 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Near Surface Geophysics 2008 Kraków, Poland, 15 - 17 September 2008, 4 pp.