

Бобачев А.А., Зайцев Д.А., Модин И.Н., Яковлев А.Г.

ЭЛЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ ХВОСТОХРАНИЛИЩА ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО КОМБИНАТА

Введение

На территории хвостохранилища одного из горно-обогатительных комбинатов выполнены работы методом вертикального электрического зондирования [1]. Целью исследований было изучение строения дамбы, выполненной из глыб магматических и метаморфических пород, и поддонных отложений на акватории хвостохранилища, которые состоят из мелких обводненных намывных песков, текучих и пластичных супесей мощностью до 35-40 м.

Использование опорных инженерно-геологических скважин позволило изучить методом ВЭЗ строение разреза по профилям до глубин порядка 60 м с выделением тела хвостов, каменной наброски, глинистых экранов и границ подстилающих грунтов.

При выполнении электроразведочных исследований мы столкнулись со следующими трудностями практического и теоретического характера. Наклон внешнего откоса дамбы составляет порядка 30-40 градусов. При этом горизонтальные участки откосов, по которым проложены автомобильные дороги, чередуются с крутыми откосами следующего яруса. Поэтому при интерпретации данных необходимо было учитывать фактический рельеф земной поверхности. Единственно возможная ориентация установок зондирования в таких условиях – вдоль склона дамбы. Строение дамбы, известное нам из исполнительной строительной документации, свидетельствует о резкой изменчивости разреза в горизонтальном направлении, что заставляет вести интерпретацию данных ВЭЗ в рамках моделей двумерно-неоднородных сред. Таким образом, адекватная модель разреза дамбы соответствует двумерному геоэлектрическому разрезу с рельефом, который изучается с помощью продольной установки.

Исследование дамбы

Строение дамбы

Дамба, в силу особенностей ее возведения, имеет достаточно сложное строение. Обваловка дамб выполнена из глыб магматических и метаморфических пород. В теле дамбы расположены водонепроницаемые экраны из суглинка и глины. Дамба имеет один базовый, нулевой уровень и 6 верхних ярусов, каждый из которых сложен в следующем порядке. В основании яруса уложен горизонтальный, глинистый экран, который перекрывает полностью боковой экран предыдущего яруса. Затем насыпалась каменная наброска, которая играет роль основной несущей конструкции дамбы. На следующей стадии подготовки дамбы с

внутренней стороны отсыпался боковой глинистый экран, который затем придавливался каменной наброской для того, чтобы глинистый экран не расплылся. Методика возведения дамбы изменилась при возведении 5-ого и 6-ого ярусов. В основании 5 яруса отсутствует горизонтальный, глинистый экран. 5 ярус не перекрывается каменной наброской и экранами 4-ого яруса. Поэтому на 4-ом ярусе была построена дренажная система, предназначенная для отвода вод просачивающихся с 5-ого и 6-ого яруса. 6-ой самый верхний ярус без всяких экранов перекрывает дамбу 5-ого яруса и образует с ней с небольшим сдвигом внутрь хвостохранилища практически единый ярус каменной наброски.

Методика работ

На суше электрические зондирования выполнены с помощью четырехэлектродной симметричной установки Шлюмберже. Использовалась сетка из 19 разносов питающих линий от 3 до 125 м и две приемные линии MN равные 2 и 14 м. Ориентация установки на дамбах всегда была вдоль склона для наименьшего искажения кривых электрического зондирования.



Рис.1. Вертикальные электрические зондирования на пятом уровне дамбы.

вания(см. рис. 1). Было намечено 7 поперечных профилей, пересекающих дамбу. Продольные зондирования проводились на каждом из уровней дамбы по каждому профилю, однако иногда условия не позволяли полностью развернуть установку. Переходные сопротивления заземления менялись от 50 Ом до 30 кОм. Большие значения переходных сопротивлений в

АВ были связаны с утрамбованными, обломочными грунтами, что сильно мешало проведению зондирований. По всему четвертому уровню дамбы были выполнены ВЭЗ с шагом 60 м.

Для производства работ использовался измеритель «ЭРА-МАХ» (фирма «ЭРА», г. Санкт-Петербург) и генератор «АСТРА» (фирма «Северо-Запад», г. Москва). Зондирования производились на рабочей частоте 4.88 Гц при стабилизированном токе 17 мА. Выбор частоты 4.88 Гц, с одной стороны, позволял поддерживать достаточно высокий ритм работы бригады, а, с другой стороны, низкая частота заметно уменьшает влияние индукционной помехи, которая развивается в виде прямой наводки с линии АВ на линию MN при низких удельных сопротивлениях грунтов, вызванных высокой проводимостью минерализованной воды и высоким содержанием электропроводящих минералов в виде сульфидов в отвалах.

Численный расчет кривых ВЭЗ для продольных установок

В основе интерпретации данных на дамбе лежала программа моделирования поля точечного источника для продольной установки, ориентированной вдоль двумерной структуры. Математический алгоритм и компьютерная программа IE2DP2 разработана в лаборатории электроразведки кафедры геофизики геологического факультета МГУ (авторы А.А.Бобачев, И.Н.Модин, А.Г.Яковлев) [2]. Коротко остановимся на теоретических особенностях программы.

Решение двумерной задачи для электрического поля продольной установки можно записать в виде обратного Фурье-преобразования:

$$E_y(x,0,0) = E_y^0(x,0,0) - \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \left[\int_{La} \tilde{G}(x-x', k_y, z, z') \cdot \tilde{I}s(x', k_y, z') dl' \right] k_y \sin(k_y y) dk_y.$$

Для нахождения электрического поля расчет ведется по следующему алгоритму. Сначала производится переход потенциала в спектральную область относительно пространственных частот k_y (ось y направлена вдоль двумерной структуры). Реально в программе производится расчет спектров потенциала в интервалах необходимых расстояний по x (ось x направлена поперек двумерной структуры) для разных глубин источников z' и приемников z . При этом для каждой частоты составлялась трехмерная матрица значений функции Грина $\tilde{G}_{k_y}(\Delta x, z, z')$, чтобы в последующем можно было легко интерполировать результаты для требуемых точек. Затем в спектральной области на каждой частоте решается система линейных алгебраических уравнений относительно спектральной плотности вторичных источников $\tilde{I}s(k_y)$. На следующем шаге производится интегрирование по всем внутренним и внешним контурам La , и мы получаем спектр аномального электрического поля $\tilde{E}_y^{аном}(k_y)$. Послед-

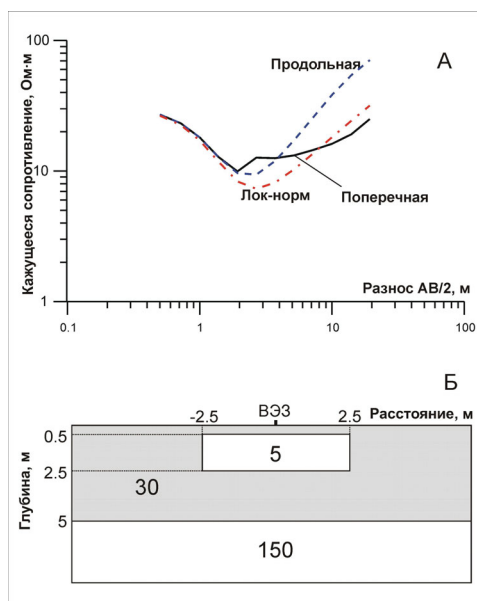


Рис.2. Пример расчета по программе IE2DP2. А – кривые ρ_k для продольной, поперечной и локально-нормальной кривой ВЭЗ на пк 0; Б – модель геоэлектрического разреза.

ний шаг - интегрирование спектров электрического поля по всем частотам в требуемых точках

$$E_y(x,0,0) = E_y^0(x,0,0) + \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \tilde{E}_y^{аном}(x, k_y) k_y \sin(k_y y) dk_y$$

Последнее выражение численно невозможно трудно рассчитать путем обычного интегрирования. Поэтому оно преобразуется к интегралу типа свертки.

На достаточно простом примере продемонстрируем разницу между кривой ВЭЗ при продольной поляризации поля и поперечной поляризации. Результаты расчетов по программам IE2DP1 и IE2DP2 показаны на рис.2. Модель геоэлектрического разреза включает двухслойную среду и проводящую вставку. Данный пример демонстрирует принципиальные различия между тремя зондированиями ВЭЗ, рассчитанными в одной

точке. Локально-нормальная кривая соответствует четырехслойному разрезу типа НА на пикете 0 ($\rho_1=30$ Ом·м, $\rho_2=5$ Ом·м, $\rho_3=30$ Ом·м, $\rho_4=150$ Ом·м, $h_1=0.5$ м, $h_2=2$ м, $h_3=2.5$ м). Поперечная кривая ВЭЗ имеет искажение при пересечении питающих электродов горизонтальных границ неоднородности, а затем опускается под локально-нормальную кривую и на больших разносах идет параллельно ей. Как будет показано ниже это поведение кривой является вполне закономерным и подчиняется искажению от так называемого Р-эффекта. Продольная кривая ВЭЗ в отличие от поперечной является гладкой, так как ни один электрод этой установки не пересекает горизонтальных границ. С другой стороны, мы видим после минимума сильный подъем кривой круче 45 градусов, что вызывается эффектом концентрации тока в проводниках.

Интерпретация данных

На рис.3 показаны результаты одномерной интерпретации (программа IPI2Win) данных ВЭЗ по четвертому уровню дамбы, который был полностью пройден по всему кольцу, окружающему акваторию тела хвостохранилища. Приведенный геоэлектрический разрез характеризует строение хвостохранилища. В основании на глубине 30 м залегают коренные породы высокого сопротивления. На них мощностью от 15 до 25 м расположены глинистые хвосты, которые имеют очень низкое сопротивление порядка 5 Ом·м. На дне хвостохрани-

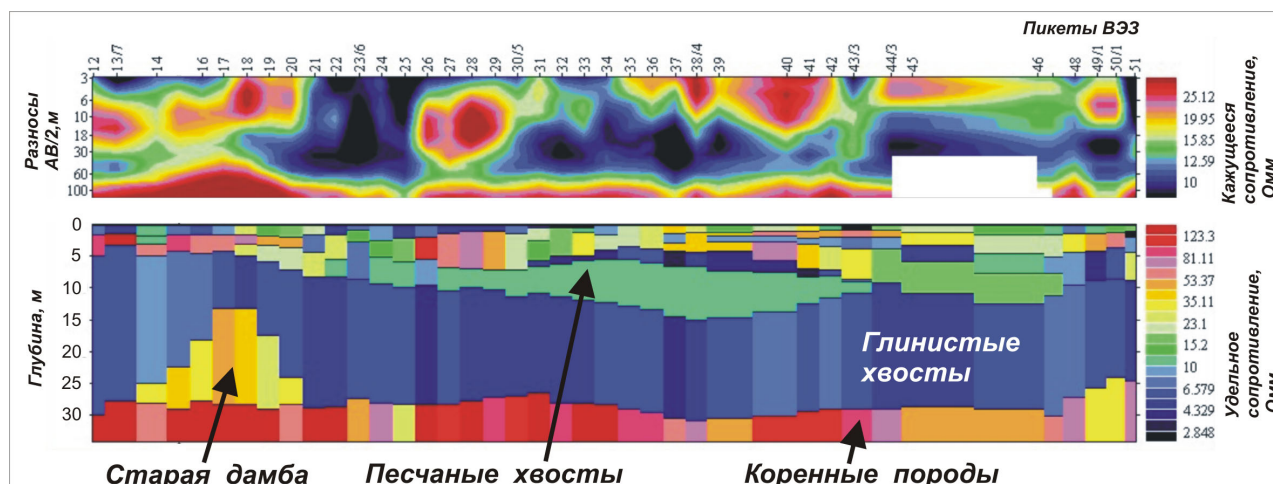


Рис.3. Результаты вертикальных электрических зондирований на четвертом уровне дамбы.

лица выявлена старая дамба шириной порядка 300 м и высотой более 10 м. В верхней части линзой размером около полутора километров под дамбой расположены песчаные хвосты мощностью около 2-5 м. Самая верхняя часть дамбы характеризуется сильной неоднородностью и геометрической невыдержанностью отсыпки материала, который слагает собственно само тело дамбы.

На окончательной стадии интерпретации все результаты, полученные по программе IPI2Win, переносились в файлы программы двумерного моделирования IE2DP2, предназначенной для установок, ориентированных вдоль двумерных структур (поперечный профиль наблюдений) на негоризонтальном рельефе. При этом учитывалась вся известная априорная информация по строению дамбы, включая практически все тонкие особенности, выявленные бурением и известные из исполнительной строительной документации. Моделирование и корректировка моделей производилось до тех пор, пока мы все практические кривые ВЭЗ не совпадали с теоретическими расчетными данными.

Разрез по поперечному створу дамбы, представленный на рис. 4, является типичным. На разрезе хорошо прослеживается стадийность возведения дамбы.

Кривые ВЭЗ фиксируют пять слоев дамбы и коренных отложений.

1-ый верхний слой каменной наброски имеет разное сопротивление в зависимости от влажности и глинистости. Самое высокое сопротивление имеют ярусы 1-ый, 4-ый и 6-ой. Здесь сопротивление свыше 150 Ом·м. Ярусы 2-ой, 3-ий и 5-ый имеют сопротивление от 50 до 100 Ом·м. Мощность наброски от 3 до 4 м.

2-ой слой глин является конструкционным гидроизолирующим элементом дамбы на 2-ом, 3-ьем и 4-ом ярусе и имеет сопротивление около 20 Ом·м. Со стороны хвостохранилища глины придавлены каменной отсыпкой с целью укрепления откоса. При расчетах электриче-

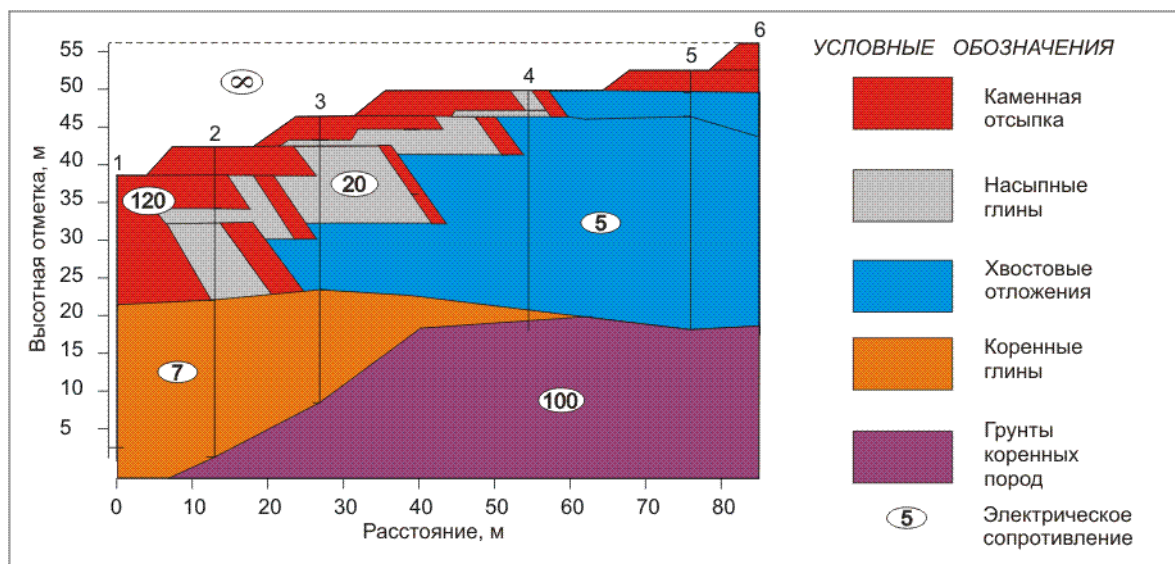


Рис. 4. Геоэлектрический разрез по поперечному створу дамбы.

ского поля влияние этого слоя обязательно учитывалось и вводилось как обязательный элемент геоэлектрического разреза.

3-ий слой хвостовых отложений меняется по сопротивлению в зависимости от расстояния от границ дамбы. На ярусе 6 сопротивление хвостов менее 7 Ом·м, а на 3-ьем ярусе порядка 15 Ом·м. Мощность слоя хвостов меняется от 12 метров под 3-им ярусом до 32 м под 6-ым ярусом.

4-ый слой коренных глины и суглинков имеет сопротивление около 7-10 Ом·м и мощность от значительной под ярусами 1-ым и 2-ым (около 20 м) до 7.5 м под 6-ым ярусом;

5-ый слой массивных скальных грунтов имеет сопротивление от 50 до 100 Ом·м. Сопротивление коренных пород постепенно нарастает к 4-ому ярусу.

Акваторные исследования

Методика электрических зондирований на акватории

Сбор данных вертикальных электрических зондирований на акватории производился с помощью специальных плавающих кос. Работы осуществлялись с помощью двух лодок на открытой акватории хвостохранилища.

На головной лодке устанавливался GPS-приемник, который фиксировал положение начала косы, а на второй лодке GPS-приемник фиксирует положение хвоста косы, которая в зависимости от ветра и течений может отклоняться на большие расстояния и в общем случае не идет в створе с головной лодкой. При работах на акватории хвостохранилища применялась установка для производства электрических зондирований, показанная показанными на рис.5 .

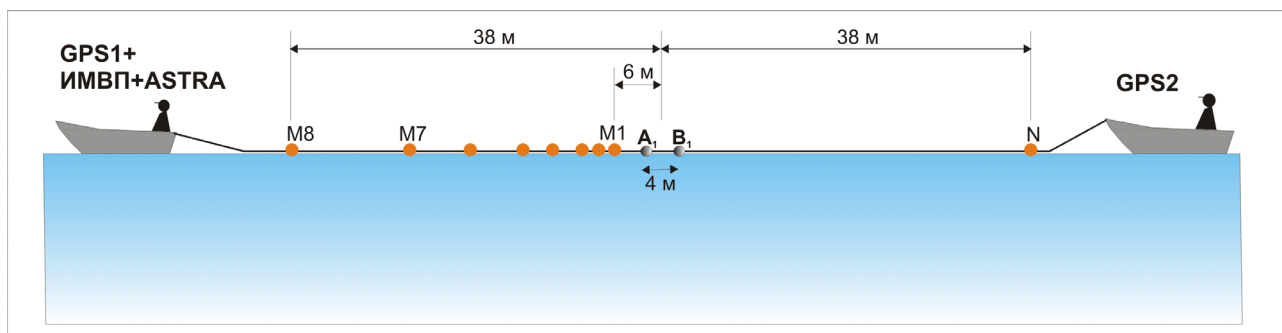


Рис. 5. Схема акваторной электроразведочной установки.

Технология измерений предусматривала использование 8-канального автоматического измерителя ИМВП и генератора АСТРА (технические разработки фирмы СЕВЕРО-ЗАПАД, г. Москва). Измеритель ИМВП позволяет в режиме реального времени (практически непрерывно) снимать кривые ВЭЗ с частотой оцифровки данных 20 кГц. При условии, что была выбрана рабочая частота 4.88 Гц после сильного осреднения данных в течение 3-х часов работы было получено около 800 кривых ВЭЗ. При этом использовалась так называемая *несимметричная, инверсная, четырехэлектродная установка*, в которой питающие и приемные электроды были переставлены в соответствии с принципом взаимности. Максимальный разнос составлял 38 м, что обеспечивало глубинность исследования порядка 20 м.

Восьмиканальный измеритель ИМВП предназначен для автоматизированного сбора электроразведочных данных. Прибор работает под управлением персонального компьютера типа Notebook. На каждом канале предусмотрены свои входные усилители, которые работают с 24-разрядным АЦП, что собственно и дает возможность резко повысить скорость измерений без переключения и коммутации входных каналов. Частотный диапазон измеряемых сигналов от 0 до 200 Гц. Собственные шумы, приведенные к входу, не выше 2 мкВ. Вес измерителя составляет всего 350 г. В приемных усилителях предусмотрены режекторные фильтры с подавлением промышленных частот 50, 100 и 150 Гц не менее чем на 120 Дб. Входное сопротивление каждого канала не менее 5 Мом. Измеритель работает при температурах от -15 до $+40^{\circ}\text{C}$.

Строение толщи отложений на акватории хвостохранилища

Обработка акваторных зондирований проводилась путем осреднения для каждой точки зондирования в интервале времени 10 с, что при рабочей частоте 4.88 Гц соответствует накоплению примерно 50 периодов. При скорости движения 2 м/с шаг между точками зондирования получился около 20 м. Необходимо отметить, что при таком значительном накоплении сигнала качество полевых материалов получилось очень высоким. Это дало возмож-

ность подбирать кривые теоретических ВЭЗ к практическим с невязкой не хуже, чем 0.5%, а основная часть кривых подобрана с точностью 0.2-0.3%, что уменьшает пределы действия принципа эквивалентности для полученных параметров среды до первых процентов и делает результаты электроразведки такими же достоверными как бурение и сейсморазведка. Для каждого канала значения полученной разности потенциалов умножены на соответствующий геометрический коэффициент, который учитывает расстояния между приемными и питающими электродами. Кроме этого введены поправки за ток в линии АВ, который периодически измерялся в начале, во время и конце работы. В данных благоприятных условиях возбуждения тока стабильность тока составляла первые десятые доли процента. Таким образом для всего массива данных были рассчитаны кажущиеся сопротивления на каждом разносе. На последнем этапе обработки данные были переведены в форматы программы IPI2WIN и подвергнуты интерпретации.

Параллельно с результатами зондирования выполнена обработка треков, полученных при помощи GPS-приемников. Для всех рассчитанных по времени точек зондирования сделаны расчеты координат центра электроразведочной установки с учетом положения передней и задней лодки в предположении, что центр зондирования лежит на прямой линии, соединяющей два рабочих приемника GPS. При этом на надежность расчетов указывает контролируемая на каждой точке дистанция между приемниками. Если точность расчета расстояния между GPS-приемниками оказывалась в пределах 5 м, то такие данные считались приемлемыми.

В результате интерпретации все полученные сопротивления слоев были разделены на четыре класса (см.рис.6): 1) слои, имеющие удельное сопротивление до 5 Ом·м условно принимаются за глины; 2) слои с удельным сопротивлением от 5 до 10 Ом·м соответствуют суглинку; 3) фракции хвостов, имеющие сопротивление от 10 до 15 Ом·м мы относили к супесям; 4) сравнительно высокоомные хвосты с сопротивлением выше 15 Ом·м идентифицированы как пески. Как показали измерения сопротивление водного слоя меняется в незначительных пределах от 1.72 Ом до 1.70 Ом. Поэтому можно с уверенностью утверждать, что в данном случае сопротивление хвостов целиком определяется глинистостью. Анализ данных показал, что информативными в структурном отношении являются четыре глубины, которые необходимо откладывать относительно дна: 0, 5 м, 10 м и 15 м. Для этих 4 глубин были построены карты распространения литологических типов осадков. Остановимся на основных особенностях полученных материалов.

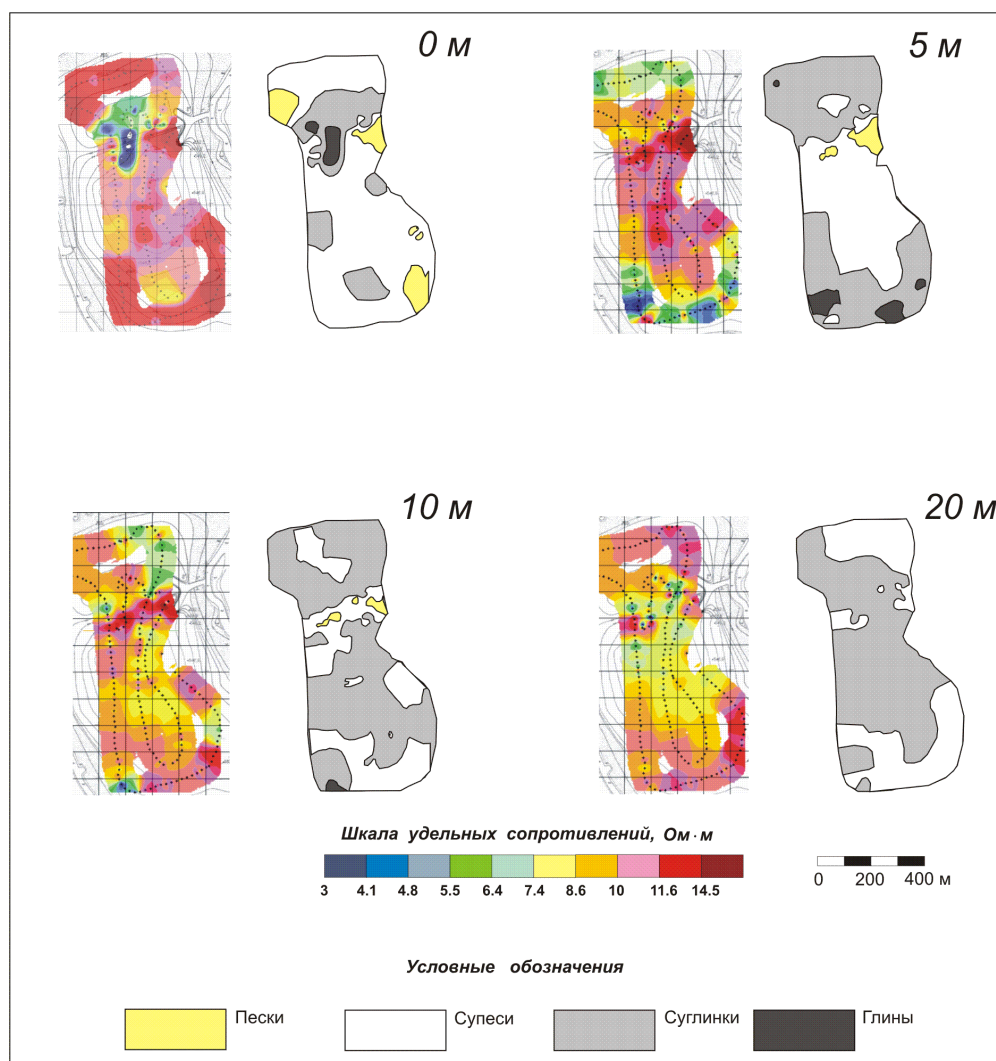


Рис. 6. Результаты интерпретации непрерывных зондирований с несимметричной, инверсной четырехэлектродной установкой на акватории хвостохранилища для разных глубин относительно дна акватории. Слева – карта распределения сопротивлений слоев, залегающих на дне, на глубине 5 м относительно дна, на глубине 10 и 20 м. Справа – карта литологических типов хвостовых отложений для разных глубин.

1. В целом хвосты в нашей терминологии отвечают супесчаным и суглинистым разностям материала. Чисто песчаные и глинистые отложения являются фрагментарными (на карте 0 м (рис.6) они занимают менее 10% от обследованной площади акватории, на карте 5 м - менее 5 %, на карте 10 м – менее 1 %, на карте 20 м – не встречаются). Это частично можно объяснить потерей с глубиной разрешающей способности метода по отношению к тонким слоям.

Однако контраргументом против этого служат размеры песчаных и глинистых линз, выходящих на дно. Они составляют порядка 100-150 м. Пропустить такие неоднородности на глубине 10 м практически невозможно.

2. На картах 0, 10 м и 20 м прослеживается правильная фациальная изменчивость, характерная для водоема, в котором снос материала происходит от берега к центру акватории. То есть по берегам залегают более грубообломочные фации (пески и супеси), а в центре водоема тонкообломочные (суглинки и глины).

3. Распределение хвостовых фаций на глубине 5 м относительно дна является инверсным. В центре водоема распространены более грубообломочные фации супесей, а по берегам вдоль северного и южного берега распространены тонкие фации суглинков и глин.

Единственный вывод, который напрашивается в данном случае, точечный источник сброса пульпы находился в северном квадрате и пульпа сбрасывалась в какой-то период в центре водоема.

4. На глубине 10 м высокими значениями сопротивлений откартирована дамба, соединявшая западный и восточный берега и расположенная в данный момент под уровнем воды и погруженная в толщу хвостовых отложений.

Выводы

В результате выполненных исследований были получены следующие результаты:

1. Для выполнения зондирований на теле дамбы использовалась симметричная продольная установка Шлюмберже. Кривые ВЭЗ на дамбе подбирались с помощью программы двумерного моделирования в условиях негоризонтального рельефа. Результаты электрических зондирований хорошо согласуются с данными бурения на дамбе, что позволило построить достоверные геолого-геофизические разрезы. Изучено строение разреза дамбы хвостохранилища до глубин порядка 60 м с выделением тела хвостов, каменной наброски, глинистых экранов и границ подстилающих грунтов. Установлено, что мощность каменной наброски соответствует исполнительной строительной документации. Однако сопротивление каменной наброски на всех ярусах разное. Самое низкое сопротивление имеет 5 ярус, лишенный глинистого экрана. Уменьшение сопротивления до 20-30 Ом·м свидетельствует о просачивании воды из водохранилища в борт 5-ой дамбы (вода в хвостохранилище имеет значительную минерализацию). Можно отметить, что 2 и 3 ярус дамбы в ряде случаев также имеет пониженное сопротивление, что свидетельствует о просачивании воды через основание дамбы.

2. Для изучения структуры залегания хвостовых отложений на акватории была использована несимметричная, инверсная четырехэлектродная установка с помощью которой удалось выполнить электрические зондирования на всей доступной акватории хвостохранилища. При этом было выявлено, что залегание хвостовых отложения подчиняется закономерности для фациальной изменчивости морских отложений: чем ближе к берегу расположены осадки, тем более грубый терригенный материал отлагается в данном месте. На глубине 5 метров зафиксирована обратная ситуация, при которой пульпа выбрасывалась в центре водоема. По-видимому, такой режим сброса должен был по замыслу проектировщиков привести к повышению гидроизолирующих свойств дамбы.

Литература

1. Геоэкологическое обследование предприятий нефтяной промышленности / Под ред. проф. В.А.Шевнина и доц. И.Н.Модина. М., Руссо, 1999 г. – 511 с.
2. Электрическое зондирование геологической среды. Ч. I/Под ред. Хмелевского В. К. и Шевнина В. А.-М.: Изд-во МГУ, 1988. – 175 с.