

ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Разработка методов контроля устойчивости и прогноза физического состояния гидротехнических сооружений (ГТС) - водохранилищ, прудов, земляных плотин, дамб, является весьма актуальной, так как нарушение их функционирования связано не только с возможным значительным экономическим и экологическим ущербом, но иногда способно приводить к авариям, представляющим опасность для жизни людей. Только в Пермском крае насчитывается более 1100 различного рода действующих ГТС.

Одной из основных причин разрушения ГТС часто является невыполнение своевременных ремонтно-восстановительных мероприятий, которые, в свою очередь, не планируются из-за отсутствия либо недостаточности информации о состоянии конструкций ГТС (наличия зон разуплотнения пород, степени их однородности, влагонасыщенности и др.). Использование для этой цели инженерно-геологических методов не обеспечивает в полной мере решение данных вопросов в силу дискретного характера информации, получаемой при обследовании шурфов и скважин, а также относительно высокой стоимости выполнения работ. При этом само механическое воздействие на ГТС не способствует сохранению его прочностных характеристик.

В связи с этим в последнее время все большее внимание уделяется созданию новых технологий оперативного неразрушающего контроля устойчивости и прогноза физического состояния гидротехнических объектов, основанных на использовании геофизических методов [1-3, 5].

Целью исследований, рассмотренных в данной публикации, явилась разработка технологии комплексного геофизического обследования ГТС на основе создания новых технологических решений в области полевой съемки, обработки, интерпретации и физико-геологического истолкования получаемых материалов. Использован следующий комплекс геофизических методов: инженерная сейсморазведка, георадарное зондирование, вертикальное электрическое зондирование, метод естественного поля. Основной принцип формирования комплекса – повышение однозначности решения обратной геофизической задачи и физико-геологического истолкования получаемых материалов на основе использования совокупности взаимодополняющих физических параметров с учетом индивидуальных информационных возможностей каждого из методов относительно определения структурных, литологических и петрофизических характеристик среды.

Учитывая специфику изучаемых объектов, одним из необходимых элементов при создании технологии изучения ГТС является решение следующих вопросов: а) создание типовых физико-геологических моделей типовых гидротехнических сооружений; б) проведение численного моделирования в целях оценки аномальности проявления в физических полях зон с ослабленными физико-механическими свойствами; в) изучение коррелятивных соотношений между разными физическими характеристиками среды.

Наиболее распространенной конструкцией ГТС на территории Пермского края являются земляные насыпные плотины и дамбы, формируемые из глинисто-щебенистого материала. На основе анализа совокупности типовых моделей ГТС разных районов Пермского края была сформирована характерная типовая физико-геологическая модель (Таблица 1), послужившая основой для проведения численного моделирования с целью оценки физических характеристик основных толщ пород и особенностей их проявления в геофизических полях.

Таблица 1. Основные характеристики характерной типовой физико-геологической модели ГТС Пермского края

№ слоя	Описание	Мощность слоя, м	Плотность, г/см ³	К-т пористости	УЭС, Ом·м	V _p , м/с	V _s , м/с
1	1а – почвенно-растительный слой (1,5 г/см ³) 1б - Насыпной щебенистый грунт	0,6-1,2	1,6-1,8	0,5-0,6	20-250	100-250	30-100
2	Насыпной суглинок от твердого до мягкопластичного с щебнем 20-40%	1,2-1,8			25-70	300-800	50-400
3	Суглинок с прослоями супеси	1,7-2,2	1,9-1,96	0,7-0,9	40-70	600-1000	100-600
	глина от тугопластичной до мягкопластичной	3,0-3,7			10-20	800-1500	100-750
4	Суглинок тяжелый, туго-мягкопластичный	9-11	1,92-1,94	0,65-0,7	35-45	600-1200	250-700
5	Коренные породы – аргиллит сильноветрелый, трещиноватый; песчаник мелкозернистый, на глинистом цементе, сильноветрелый, ангидрит, гипс	> 10	2,0-2,2	---	200-2000	1500-2400	400-1200

Результаты численного моделирования сейсмического и электрического полей, выполненные на основе обобщенной ФГМ показали, что в геоэлектрическом и временном разрезах находят отображение практически каждый из слоев обобщенной ФГМ, обеспечивая возможность уверенного расчленения разреза ГТС и выявления потенциально опасных зон

(рис. 1-2). Так, участки повышенной влажности уверенно отображаются пониженными значениями в поле кажущихся сопротивлений (рис. 1, б) и в поле удельных электрических сопротивлений (рис. 1, в). При этом уверенно фиксируются параметры аномальных участков – их степень отличия от окружающих грунтов по физическим свойствам, форма, глубина, размеры по горизонтали.

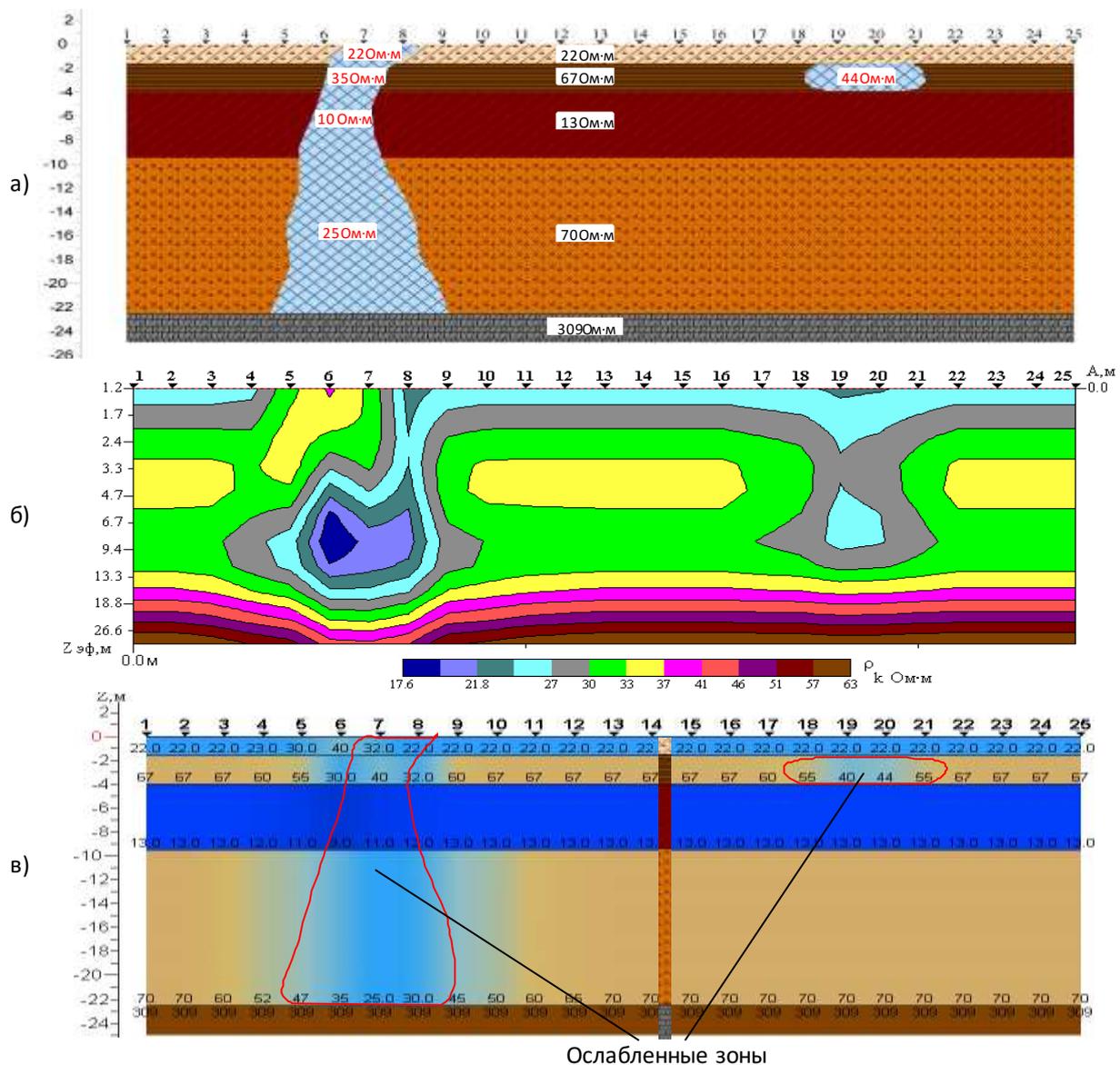


Рис. 1. Результаты численного моделирования электрических зондирований для типовой пятислойной физико-геологической модели ГТС Пермского края с ослабленными зонами (а): б – разрез кажущихся сопротивлений; в – разрез удельных электрических сопротивлений

Результаты моделирования сейсмических волновых полей, в свою очередь, указывают на возможность выделения грунтов с пониженными упругими свойствами – скоростью упругих волн и плотностью. Аномалии скоростей продольных волн, заложенные в модель, четко проявляются как в

полевом материале – сейсмограмма общего пункта возбуждения (рис. 2, в), так и в результатах обработки – временном разрезе (рис. 2, б).

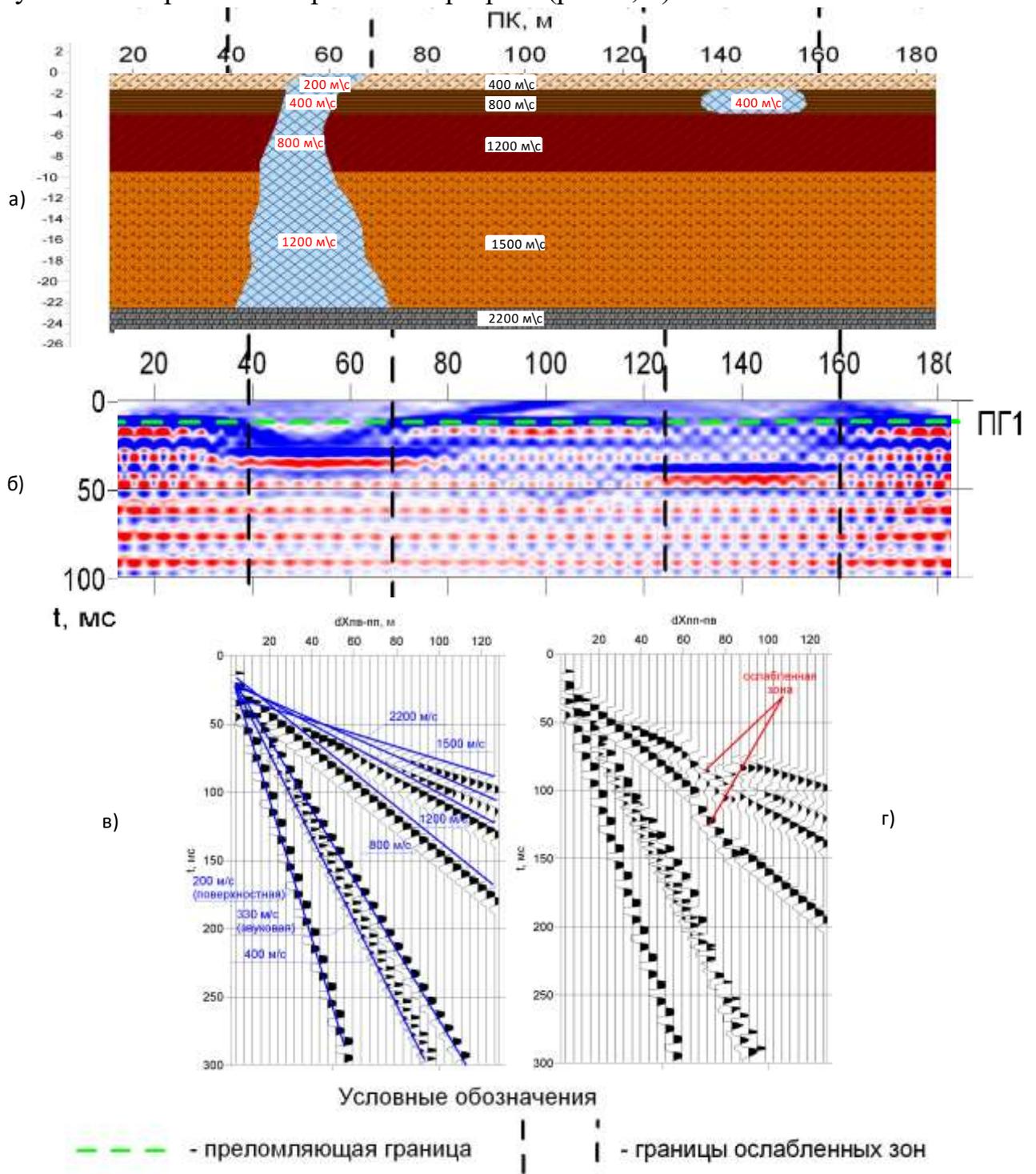


Рис. 2. Результаты численного моделирования сейсмического волнового поля для типовой пятислойной физико-геологической модели ГТС Пермского края с ослабленными зонами (а); б - разрез общей глубинной площадки (ОГП) для преломляющей границы №1; в – сейсмограмма общего пункта возбуждения (ОПВ) для участка без ослабленной зоны; г - сейсмограмма ОПВ для участка с ослабленной зоной.

Поскольку эффективность использования геофизических методов определяется совокупностью аппаратурно-программного и

интерпретационного обеспечения выполнения работ, при создании новой технологии обследования дамб и плотин были привлечены и исследованы возможности современных аппаратурных и компьютерных средств, в том числе и разработанных авторами [****].

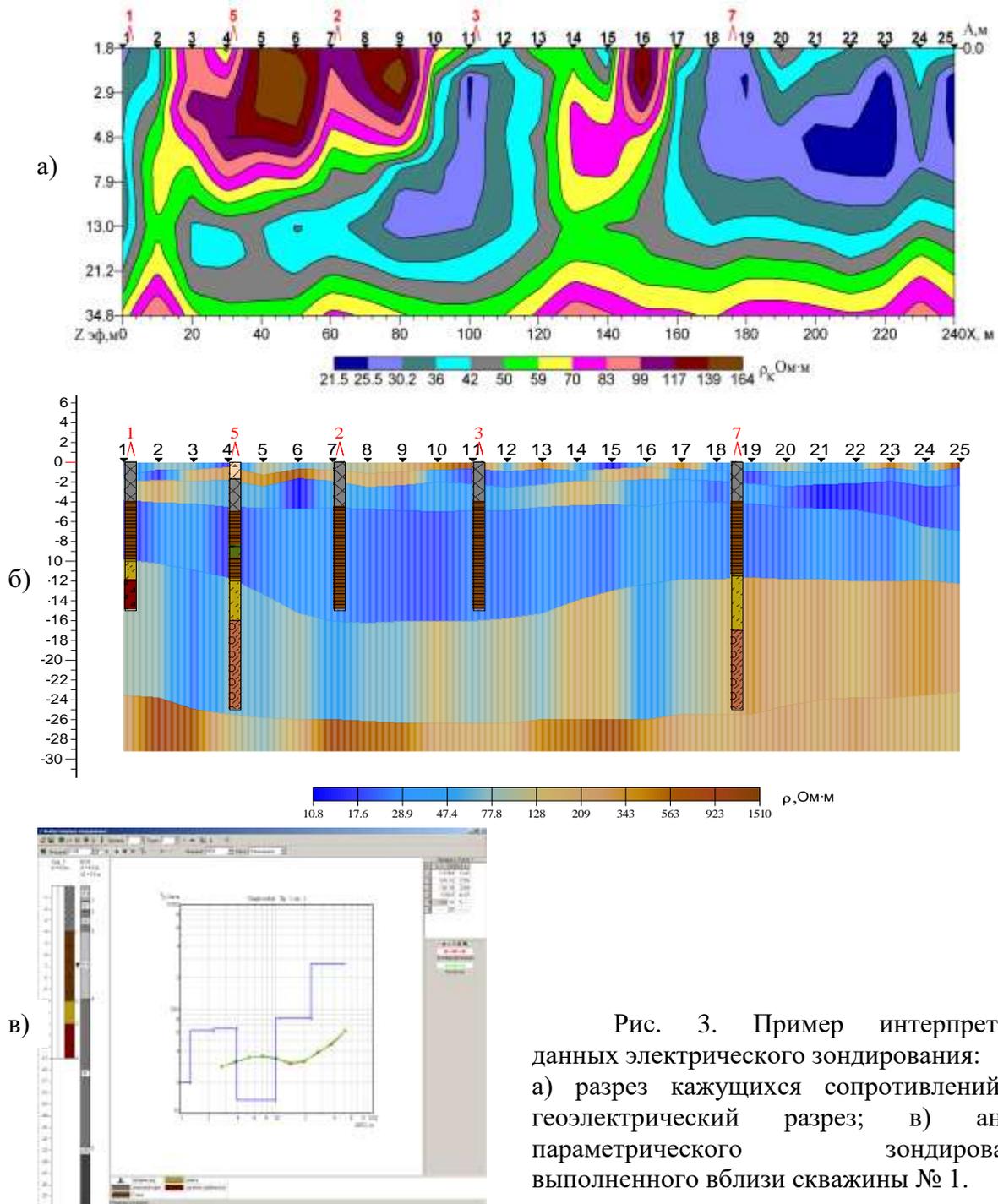


Рис. 3. Пример интерпретации данных электрического зондирования: а) разрез кажущихся сопротивлений; б) геоэлектрический разрез; в) анализ параметрического зондирования, выполненного вблизи скважины № 1.

Для производства работ электроразведочными методами вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) и естественного поля (ЕП) использован запатентованный аппаратурно-программный комплекс АМС-1, обладающий повышенной помехозащищенностью и высокой точностью измерений, а для физико-геологического истолкования получаемых материалов –

сертифицированная система программ «ЗОНД» [3], позволяющая в автоматическом режиме осуществлять качественную и количественную интерпретацию полевых материалов с получением количественных параметров как отдельных слоев, так и любой заданной части разреза. Повышение однозначности результатов интерпретации достигается за счет использования данных бурения скважин, и результатов литологического расчленения разреза с помощью георадарных и сейсмических методов наблюдений.

Пример интерпретации данных ВЭЗ для одного из ГТС по ул. П.Морозова в г. Кунгуре Пермского края приведен на рис. 3. По результатам количественной интерпретации получен шестислойный геоэлектрический разрез, в целом согласующийся с типовой моделью. На геоэлектрическом разрезе выделяются четыре основных геоэлектрических комплекса. Первый из них представлен неоднородными по составу насыпными грунтами (суглинок щебенистый), залегающими в интервале глубин 0 - 5 м. Второй комплекс находится в интервале 4-16 м и характеризует породы, представленные глинами. Далее до глубины 24-27 м следуют породы третьего комплекса, отображающие свойства обвально-карстовых отложений (супесь, щебень, глыбы). Разрез Рк и геоэлектрический разрез позволяют отследить области пониженных электрических сопротивлений, отождествляемых, с высокой степенью вероятности, с повышенной влажностью грунтов.

Опытные сейсморазведочные исследования выполнены методами преломленных (МПВ) и отраженных волн (МОВ) с соответствующими системами наблюдения. Основой для проектирования систем наблюдения служила максимальная глубина изучения разреза – 15 -20 м и априорная геологическая информация о строении ГТС, требующих обследования. Параметры систем наблюдения МПВ – шаг пунктов возбуждения (ПВ) = 4-16 м, шаг пунктов приема (ПП) = 1-2 м, максимальное удаление ПП от ПВ – 64-128 м, шаг дискретизации – 0.2 – 0.5 мс, длина записи – 512 – 1024 мс, в открытом канале.

Параметры систем наблюдения МОВ – шаг пунктов возбуждения (ПВ) = 1-2 м, шаг пунктов приема (ПП) = 1 м, максимальное удаление ПП от ПВ – 32-64 м, шаг дискретизации – 0.2 – 0.5 мс, длина записи – 512 – 1024 мс, в открытом канале.

Для регистрации во всех случаях использована 64-канальная телеметрическая цифровая сейсмостанция IS-128 (ООО «Интромаг», г. Пермь) в комплекте с вертикальными и горизонтальными сейсмоприемниками GS-20DX (ООО «Ойо-Геоимпульс», г. Уфа).

Для обработки, интерпретации, и визуализации сейсморазведочных данных использована программа RadExpro Plus Total 3.7. Она позволяет осуществить в рамках одной системы весь процесс обработки и интерпретации данных методами отраженных и преломленных волн: чтение и визуализацию сейсмограмм, амплитудную коррекцию, двумерную и полосовую фильтрации, учет рельефа, корреляцию и увязку годографов преломленных волн, определение скоростей продольных и поперечных волн, построение модели среды.

В ходе выполнения опытных работ по изучению ГТС, выявлен ряд особенностей применения сейморазведочных работ. По результатам анализа выявленных особенностей составлены рекомендации, в общем виде приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Особенности применения основных методов инженерной сейморазведки

Поверхностные условия	Параметрическое обеспечение, априорная геол. информация	Предпочтительный метод	Примечания
Грунтовая поверхность	Имеется	МПВ	Уверенная регистрация продольных и поперечных волн в МПВ
То же	Отсутствует	Применение сейморазведки не рекомендуется, либо рекомендуется перенос полевых работ на зимний период (см. ниже)	Уверенная регистрация продольных и поперечных волн в МПВ, однако возможны ошибки из-за «выпадения слоя»
Твердое покрытие (асфальт, бетон, промерзший грунт)	Имеется	МОВ ОГТ МПВ	Затруднена регистрация продольных волн в МОВ. В МПВ особое внимание должно быть уделено привязке данных по глубине, однако изучение самых верхних слоев невозможно
То же	Отсутствует	МОВ ОГТ	Затруднена регистрация продольных волн в МОВ

В качестве примера результатов интерпретации сейморазведочных данных на рис. 6 приведены геосейсмические разрезы для ГТС по ул. П.Морозова в г. Кунгуре Пермского края. В результате количественной интерпретации данных сейморазведки выделено четыре геосейсмических слоя, отличающихся по пластовым скоростям распространения упругих колебаний и физико-механическим свойствам.

Совместное использование продольных и поперечных волн, выполненное с учетом [6], позволило выполнить оценку ФМС грунтов – вычислить отношение V_p/V_s , модули Юнга, сдвига, всестороннего сжатия и коэффициент Пуассона. На результативных геосейсмических разрезах (рис. 6) отмечаются области пониженных ФМС, которые ассоциируются с ослабленными грунтами в теле ГТС. ФМС используются при выполнении проектных работ, для расчета устойчивости сооружения, планирования ремонтно-восстановительных мероприятий.

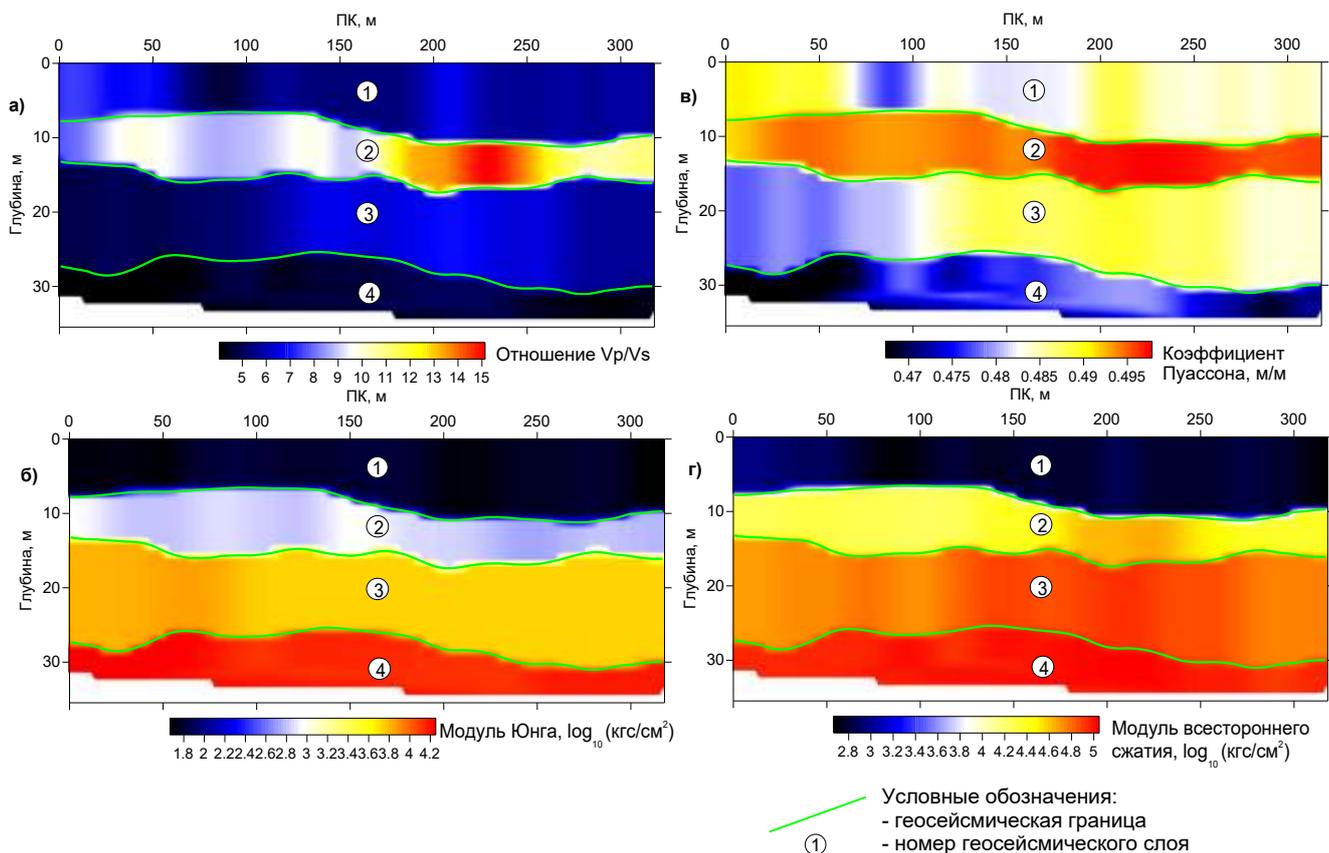


Рис. 6. Геосейсмические разрезы, совмещенные с разрезами ФМС

Георадарные измерения проводились с помощью современного аппаратно-программного комплекса ProEx (компания MALA GeoScience, Швеция) в непрерывном режиме при постоянной базе источник-приемник с применением экранированного антенного блока SA 250 МГц и неэкранированной антенны RTA 50 МГц. Для обработки, интерпретации и визуализации георадарных данных использована программа RadExplorer, которая позволяет выполнять обработку, оценку диэлектрической проницаемости грунтов и скорость распространения в них упругих волн, интерпретацию и преобразование временного разреза в глубинный разрез.

На рис. 7 приведены результаты георадарного зондирования для ГТС по ул. П.Морозова в г.Кунгуре Пермского края. На разрезе выделяется несколько отражающих границ, сопоставляемых с литологическими границами. Амплитудные характеристики записи так же указывают на различие в литологическом составе и физических свойствах грунтов.

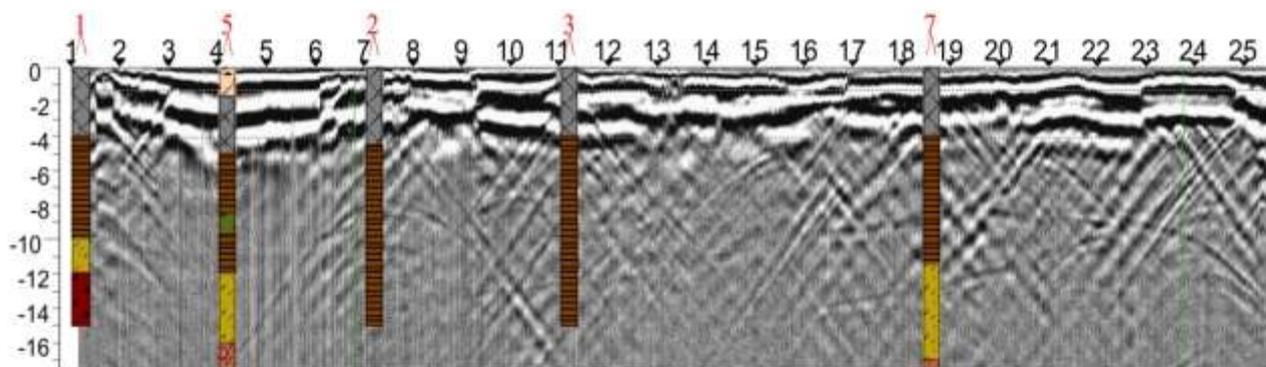


Рис. 7. Георадарный временной разрез для антенны RTA 50 МГц

В целях повышения однозначности результатов комплексного анализа, использованы приемы взаимодополняемости методов. Так, учитывая повышенную точность структурных построений, выполняемых по данным георадарных и сейсмических наблюдений, их результаты привлекались в качестве дополнительной информации при регуляризации решения обратной задачи электрического зондирования, повышая тем самым точность определения удельного электрического сопротивления слоев, обладающего, по сравнению с другими геофизическими параметрами, более тесной связью с влажностью пород.

На рис. 8 приведены результаты комплексных исследований для ГТС по ул. П.Морозова в г. Кунгуре Пермского края, которые указывают на наличие взаимной корреляции данных, полученных разными геофизическими методами. Аномальные зоны, прослеживаемые в интервале глубин 1-10 м, в пределах пикетов 7-12, 19-25, отмечаются пониженными значениями электрического сопротивления (метод ВЭЗ), уменьшением значений модуля Юнга (сейсморазведка), повышенным затуханием высокочастотного электромагнитного поля (георадарное зондирование) и увеличением абсолютных значений потенциала естественного поля (метод ЕП). Подобная корреляция согласуется с известными петрофизическими и физико-химическим представлениям о проявлении в физических полях зон повышенной влажности, глинистости и пористости пород, способствуя повышению достоверности геологических заключений.

Наиболее уверенно структурные особенности разреза отображаются результатами сейсмометрии и георадарных наблюдений, упругие свойства – скоростными характеристиками разреза и физико-механическими свойствами грунтов, получаемыми на основе сейсмических данных, а степень увлажнения и водопроницаемости пород – методами электротметрии (ВЭЗ, ЕП, георадар). Наличие зон пониженных электрических сопротивлений, сопровождаемых отрицательными аномалиями естественного поля, свидетельствует о повышенном влагосодержании пород и происходящей фильтрации подземных вод, отражая предрасположенность данных зон к развитию суффозионных процессов. На основании этого к зонам наиболее интенсивного развития суффозионных процессов можно отнести участки профиля, расположенные в районе ПК 7-12, 19-25.

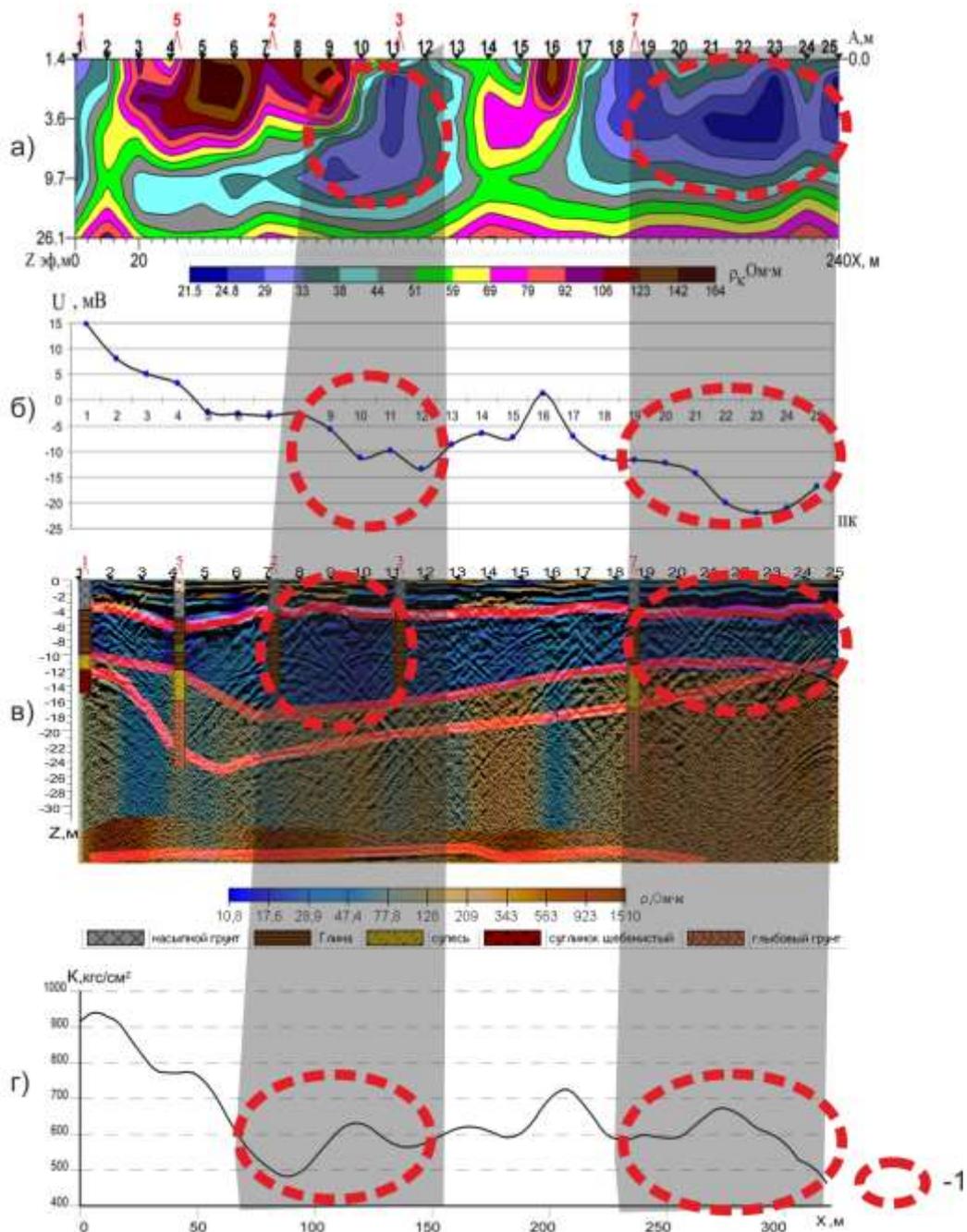


Рис. 8. Результаты комплексных геофизических исследований: а - разрез кажущегося сопротивления; б- график потенциала естественного электрического поля; в - геоэлектрический разрез, совмещенный с георадарным; г - график модуля всестороннего сжатия для первого геосейсмического слоя (1- участки ослабленных грунтов)

Данная технология апробирована на большом объеме материала в условиях Пермского края. По результатам комплексной интерпретации сейсморазведочных и электрометрических исследований даны рекомендации для разработки оптимальных ремонтно-восстановительных мероприятий: работы по берегоукреплению реки, а также по созданию дренажных сооружений для отвода подземных вод, залегающих в интервале насыпных грунтов для предотвращения суффозионных и оползневых процессов.

Выводы.

Использование новой технологии комплексных геофизических с использованием методов инженерной сейсмологии, георадиолокации, электрического зондирования, естественного электрического поля на базе новых аппаратных и интерпретационных возможностей обеспечивает возможность уверенной диагностики физико-геологического состояния гидротехнических сооружений.

Список литературы

1. Воронков, О.К. Геофизическая диагностика состояния и свойств грунтовой плотины и основания, сложенных глинистыми грунтами / О.К.Воронков, Н.Н.Сигачева, Г.А.Моторин, Л.Ф.Ушакова // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. – 2007. – Т. 246. – С. 3-14.
2. Джурик, В.И. Опыт электроразведочных исследований состояния и поля фильтрации грунтовых плотин / В.И.Джурик, С.П.Серебренников, А.Ю.Ескин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2006. – № 5. – С. 459-466.
3. Колесников, В.П. Основы интерпретации электрических зондирований / В.П.Колесников. – М: Научный мир, 2007. – 248 с.
4. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики: Учебник для вузов / Под редакцией В.А.Богословского. - М.: Недра, 1990. -501 с.
5. Простов С.М., Костюков Е.В., Бахаева С.П. / Прогноз устойчивости грунтовых дамб / Кемерово / КузГТУ / 2006. 171 с.
6. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. – М, Госстрой РСФСР, РосГлавНИИСтройпроект, Производственное объединение «Стройизыскания», 1974 г.