УДК 550.83

В.В.ГЛАЗУНОВ, *д-р техн. наук, профессор, VVGlazounov@mail.ru*
С.М.ДАНИЛЬЕВ, *ассистент, daniliev@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет
Н.Н.ЕФИМОВА, *канд. техн. наук, старший научный сотрудник, natafima@mail.ru*
ФГУ НПП «Севморгео», Санкт-Петербург

V.V.GLAZUNOV, *Dr. in eng. sc., professor, VVGlazounov@mail.ru*
S.M.DANILYEV, *assistant lecturer, daniliev@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University
N.N.EFIMOVA, *PhD in eng. sc., senior research assistant, natafima@mail.ru*
«Sevmorgeo», Saint Petersburg

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КРЕПЛЕНИЯ ВЕРХОВОГО ОТКОСА ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН

Рассмотрены возможности георадиолокационных исследований для неразрушающего контроля состояния крепления верховых откосов грунтовых плотин гидротехнических сооружений. Сформулированы основные диагностические признаки волнового электромагнитного поля, характеризующие размещение дефектов крепления плотин. Намечены перспективы применения метода георадиолокации при изучении гидротехнических сооружений.

***Ключевые слова*:** георадиолокация, мониторинг гидротехнических сооружений, состояние крепления верхового откоса плотин, полости и зоны разуплотнения грунта под железобетонными плитами, математическое моделирование георадиолокационных эффектов.

APPLICATION OF THE GPR-METHOD FOR ESTIMATION OF THE CONDITION OF FASTENING OF THE BACKSLOPE OF SOIL DAMS

The GPR-method showing high resolution, great performance and sensitivity to minor variations in the composition and conditions of soils and material has assumed a role of the leading geophysical method for looking at the upper part of the geological section. This paper presents the advanced directions of GPR prospecting for engineering problems solution.

***Key words*:** GPR-method, monitoring of engineering constructions, condition of fastening of the backslope of soil dams, cavities and zones softening of ground under reinforced concrete slab, mathematical modelling.

Потеря устойчивости грунтового основания верхового откоса плотин происходит вследствие изменения состояния грунтов и потери прочности железобетонных плит, происходящих в результате динамического воздействия волн на крепление откоса гидротехнических сооружений. Развитие этих негативных процессов может привести к образованию серьезных повреждений, а иногда и к разрушению бетонных креплений, провоцирующих полный выход из строя гидротехнического сооружения. Для оценки надежности креплений необходим систематический эксплуатационный контроль их состояния. Учитывая, что грунты скрыты под железобетонными плитами крепления, обследование нужно проводить неразрушающими дистанционными методами

диагностики. Среди инструментальных методов неразрушающего выборочного контроля (виброакустический, тепловой, ультразвуковой) явными преимуществами обладает георадиолокационный метод благодаря обеспечению высокой эффективности, оперативности и детальности исследований*.

Важным достоинством георадиолокационного обследования является возможность проведения наблюдений на некотором удалении от поверхности объекта. Дистанционное расположение антенн обеспечивает проведение съемки при непрерывном их движении. В сочетании с узкой диаграммой направленности электромагнитной антенны это существенно повышает детальность, а следовательно, и пространственную разрешающую способность исследований**.

Перед появлением видимых разрушений креплений откосов плотин внутри насыпного тела плотин протекают скрытые негативные процессы (образование пустот, зон разуплотнения грунта земляного полотна, инфильтрация грунтовых вод по деформационным и межплитовым швам), своевременное выявление которых позволило бы вовремя принимать соответствующие меры.

Установлено, что георадары позволяют определять толщину плит крепления откосов, состояние земляной насыпи плотин, границы зон увлажнения грунтов, инородные включения в грунте, пространственные очертания границ слоев, пути инфильтрации грунтовых вод, а также выявлять дефекты, допущенные в процессе строительных работ.

Экспериментальные работы, выполненные на эталонных участках откосов плотин, на которых местоположение и параметры пустот известны, а также теоретические исследования позволили обосновать возможность применения георадиолокационного метода при обследовании состояния откосов плотин для выявления дефектов, сформировавшихся и развивающихся под железобетонными плитами крепления.

Математическое моделирование волновых полей выполнено с целью оценки влияния на волновое электромагнитное поле полостей, расположенных под железобетонными плитами. Оценки необходимы для определения возможностей и ограничений метода георадиолокации при решении поставленной задачи.

Наиболее распространенными способами расчета электромагнитных волновых полей являются численные способы на основе уравнений Максвелла и в лучевом приближении. Основой решения прямой задачи в лучевом приближении служит допущение о том, что энергия электромагнитной волны в связи с ее малой длиной распространяется направленно, по прямолинейным лучам. При этом учитываются такие явления, как поглощение, отражение, дифракция и преломление электромагнитных волн. Решение задачи сводится к получению степенного ряда, каждый член которого описывает пришедшую в точку регистрации отдельную волну, распространяющуюся из источника вдоль луча до приемника импульса.

Данный способ расчета импульсной трассы не учитывает кратных отражений электромагнитной волны от границ между слоями. В большинстве случаев кратные электромагнитные волны быстро затухают с ростом кратности. Но при наличии границ с большими контрастами диэлектрических свойств (бетон – воздух, воздух – влажный песок) кратные волны вносят существенный вклад в волновое электромагнитное поле. В большинстве случаев кратные выступают в роли волн-помех, но как показала практика поиска полостей, кратные волны выступают в качестве полезного сигнала-индикатора и потому также подлежат моделированию.

---

* *Глазунов В.В.* Оценка состояния грунтов основания железобетонных элементов гидросооружений методом радиолокации / В.В.Глазунов, Н.Н.Ефимова, В.Г.Штенгель // В мире неразрушающего контроля. 2006. № 1 (31). С.18-21.

Glazunov V.V., Efimova N.N., Shtengel V.G. GPR evaluation of the foundation soil of reinforced concrete units of hydraulic engineering structures // Not distruction metods world review. 2006. N 1 (31). P.18-21.

** *Владов М.Л.* Введение в георадиолокацию: Учеб. пособие / М.Л.Владов, А.В.Старовойтов. М., 2004. 153 с.

Vladov M.L., Starovoytov A.V. Introduction in a georadar-location / Study guide. Moscow, 2004. 153 p.

Математическое моделирование георадиолокационных эффектов от полостей, расположенных под плитами, с учетом их конфигурации и размеров требует использования двумерных (2D) моделей. Отражение электромагнитных волн от объектов, размеры которых равны длине электромагнитной волны или больше нее, формируется, как известно, от участков среды, размеры которых соизмеримы с площадью первой зоны Френеля. На неоднородностях, размеры которых меньше длины волны, или изломах рельефа отражающей границы возникает дифракция электромагнитной волны. Дифракция объясняется, по Френелю, интерференцией элементарных волн, распространяющихся из всех точек волновой поверхности. Этой волновой поверхностью является небольшая, по сравнению с длиной волны, поверхность объекта, которая после падения на нее электромагнитной волны представляет собой набор элементарных вторичных источников волн. Таким образом, рассматриваемый объект-полость представляется как сумма вторичных элементарных источников электромагнитных дифрагированных волн.

Реализация математического 2D-моделирования волновых полей от полостей, расположенными под плитами, осуществлена в программном пакете для моделирования волновых полей в сейсморазведке Tesseral-2D. Данный подход правомерен на основании аналогии проявления волновых свойств. Диэлектрические свойства среды учитываются заданием скоростных характеристик модели. Импульсная характеристика модели рассчитывается по формулам дифрагированных волн, учитываемых алгоритмом программы при заданном положении источника и приемника. Параметры моделируемого импульса соответствуют импульсу реального излучателя. При моделировании принята однолучевая система наблюдений, в которой передающая и приемная антенны совмещены. Для моделирования волновых эффектов георадара используется комплексный алгоритм, учитывающий форму криволинейных границ и размещенных на ней точек дифракции.

Результаты 2D-моделирования электромагнитного поля пустоты приведены на рис.1. Теоретические георадиолокационные эффекты от полости проявляются в виде квазигиперболы и формируются в результате отражения электромагнитных (ЭМ) волн от дна полости. Параметры квазигиперболы зависят от размеров пустоты в плане. Можно ожидать, что волновые эффекты этого типа будут наблюдаться на экспериментальных радарограммах при размерах полостей, превышающих половину длины волны электромагнитного импульса в воздухе.

Результаты численного моделирования радарограмм с помощью алгоритмов показывают, что пустоты, расположенные под

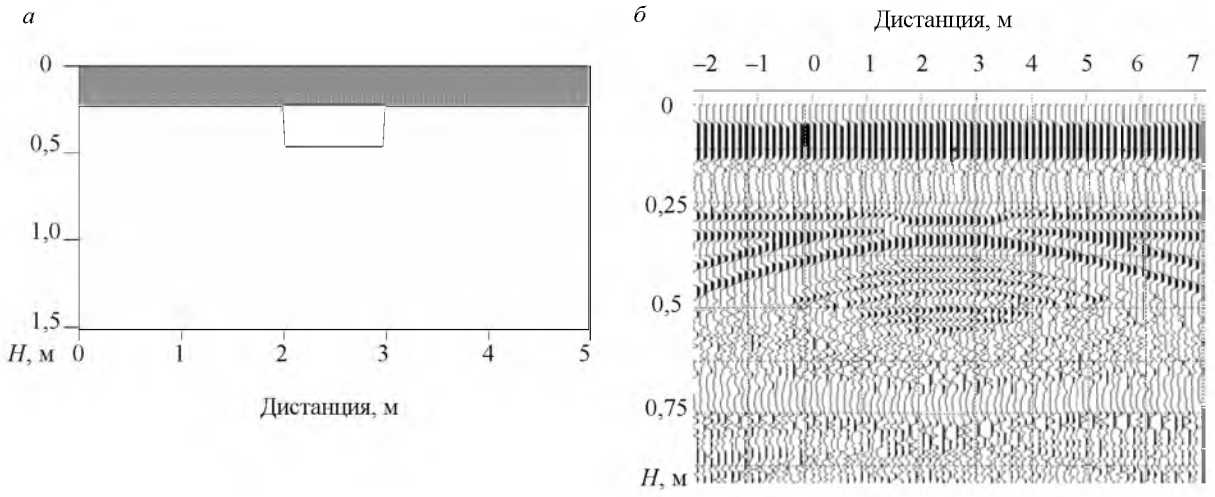


Рис.1. Двумерная электрофизическая модель полости (*а*) и синтезированные 2D-радарограммы моделей пустот (*б*)

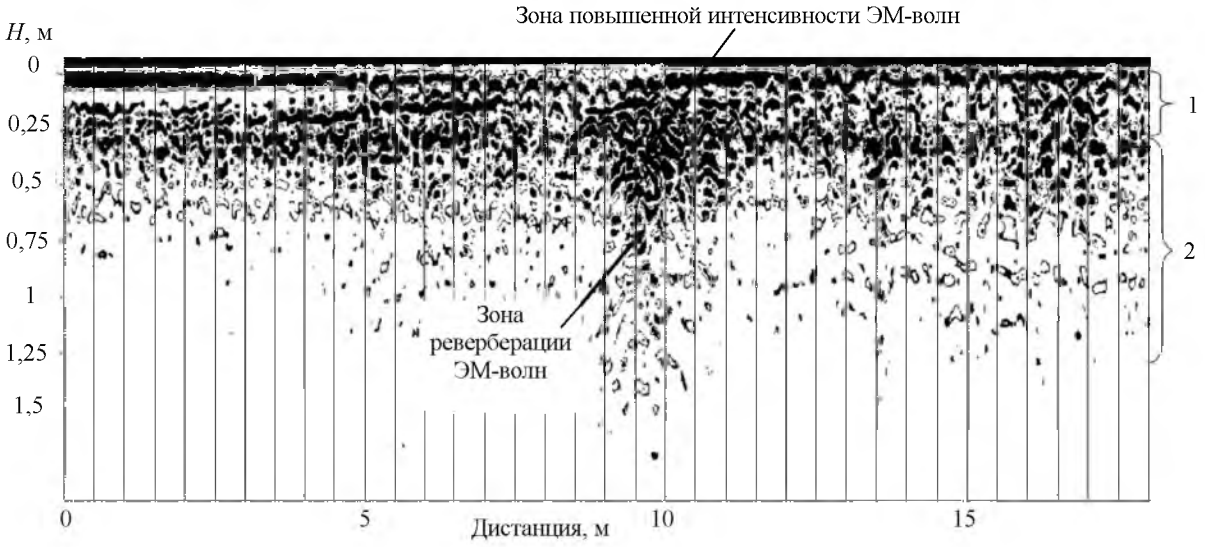


Рис.2. Радарограмма над естественной полостью

1 – бетонная плита; 2 – подсыпка

плитами, могут отражаться в волновых электромагнитных полях георадиолокационными эффектами двух типов. Эффекты первого типа представляют собой зоны реверберации, сформированные кратными электромагнитными волнами, образовавшимися на контрастных электрофизических границах бетон – воздух – влажный песок. Георадиолокационные эффекты второго типа формируются в результате отражения ЭМ-волн от дна пустоты и определяются их формой и размерами пустоты в плане и разрезе. Эти эффекты представляют собой квазигиперболы, характеристики которых зависят от геометрических параметров пустот. Учитывая высокие скорости распространения ЭМ-волн в воздухе, для регистрации данных эффектов на практике требуется использовать высокочастотные антенные системы, обладающие максимальным пространственным разрешением по вертикали.

С целью проверки и уточнения теоретических представлений о характере волновых эффектов, возникающих от пустот, проведены экспериментальные исследования на двух участках плотины. На участке 1 расположена естественная пустота, образовавшаяся под железобетонными плитами крепления откоса в результате размыва. Контуры и глубина этой пустоты известны. На участке 2 имеется открытый доступ к песчаному основанию железобетонных плит крепления откоса. На этом участке реализована возможность физического моделирования на основе формирования под плитами искусственной пустоты требуемых размеров.

Георадиолокационные исследования на участках проведены с помощью георадара «Зонд-12Е» с контактной антенной, имеющей максимальную центральную частоту зондирующих импульсов 2 ГГц. Шаг георадарного зондирований откоса плотины выбран равным 5 см.

Радарограмма, зарегистрированная на участке 1 по профилю, пересекающему естественную полость, приведена на рис.2. Глубина пустоты под плитами 38 см, а ее протяженность вдоль профиля 1,5 м. Пустота на радарограмме проявилась в виде яркой локальной интенсивной области реверберации ЭМ-волн. В пределах зоны отчетливо видны отдельные квазигиперболы, связанные с явлениями дифракции ЭМ-волн на локальных неоднородностях. Сопоставление наблюдаемой радарограммы (рис.2) с теоретической (см. рис.1, *б*) позволяет заключить, что аномальное возмущение волнового поля на радарограмме формируют волновые эффекты первого и второго типов.

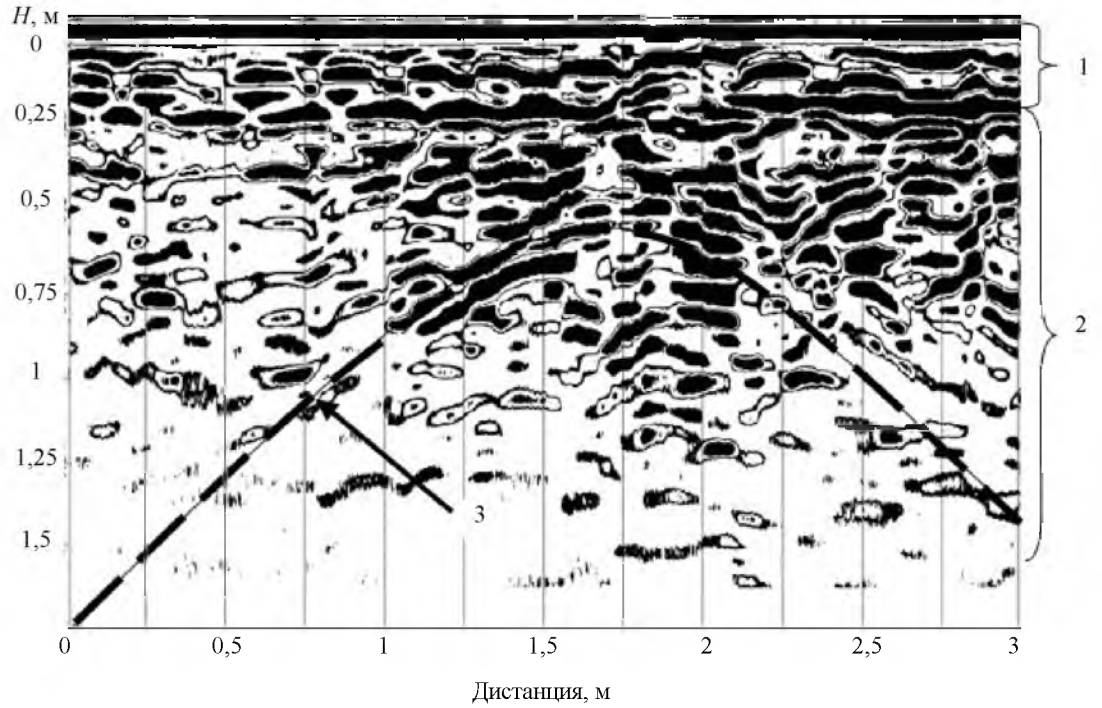


Рис.3. Фрагмент радарограммы над искусственной полостью
1 – бетонная плита; 2 – подсыпка; 3 – эффект квазигиперболы

Согласно радарограмме, зарегистрированной на участке 2 по профилю, пересекающему искусственную полость, глубина пустоты под плитами 35 см, а ширина 1,5 м. На зарегистрированной радарограмме наблюдается локальное увеличение амплитуды ЭМ-волн и одиночная квазигипербола (рис.3). Характерная зона реверберации ЭМ-волн на радарограмме не наблюдается, что можно объяснить наличием рыхлого, разуплотненного песка на дне пустоты в результате искусственной подсыпки рыхлого песка. Основным условием формирования реверберационных эффектов, как указывалось выше, является наличие резкого контраста электрофизических волн, который в случае искусственной полости отсутствует.

Искусственная пустота, сформированная на участке 2, использовалась для оценки влияния ее глубины на волновое ЭМ-поле. С этой целью георадарная съемка выполнялась по профилю, проложенному над пустотой, глубина которой последовательно уменьшалась до нуля, в результате подсыпки и разравнивания песка на ее дне. Глубина пустот составляла 15, 25 и 35 см.

На георадиолокационных разрезах, отражающих размеры искусственной пустоты в плане и на глубину (рис.4), пустота показана схематично в виде эллипса, размер которого по вертикали соответствует глубине пустоты.

Изображение аномальных зон на разрезах подобрано таким образом, чтобы их контуры приблизительно соответствовали геометрии пустоты. Сопоставление показывает, что контуры аномальных областей, окрашенных на рис.4 в черный цвет, практически соответствуют контурам пустоты под плитами.

Очевидно, что с увеличением вертикальных размеров пустот повышается надежность их локализации. Расчеты и экспериментальные данные показывают, что метод георадиолокации позволяет надежно выявлять пустоты, имеющие размеры более 20 см.

Результаты экспериментальных работ на эталонных участках плотины подтвердили и уточнили возможность применения метода георадиолокации для локализации пустот. Пространственное разрешение геора-

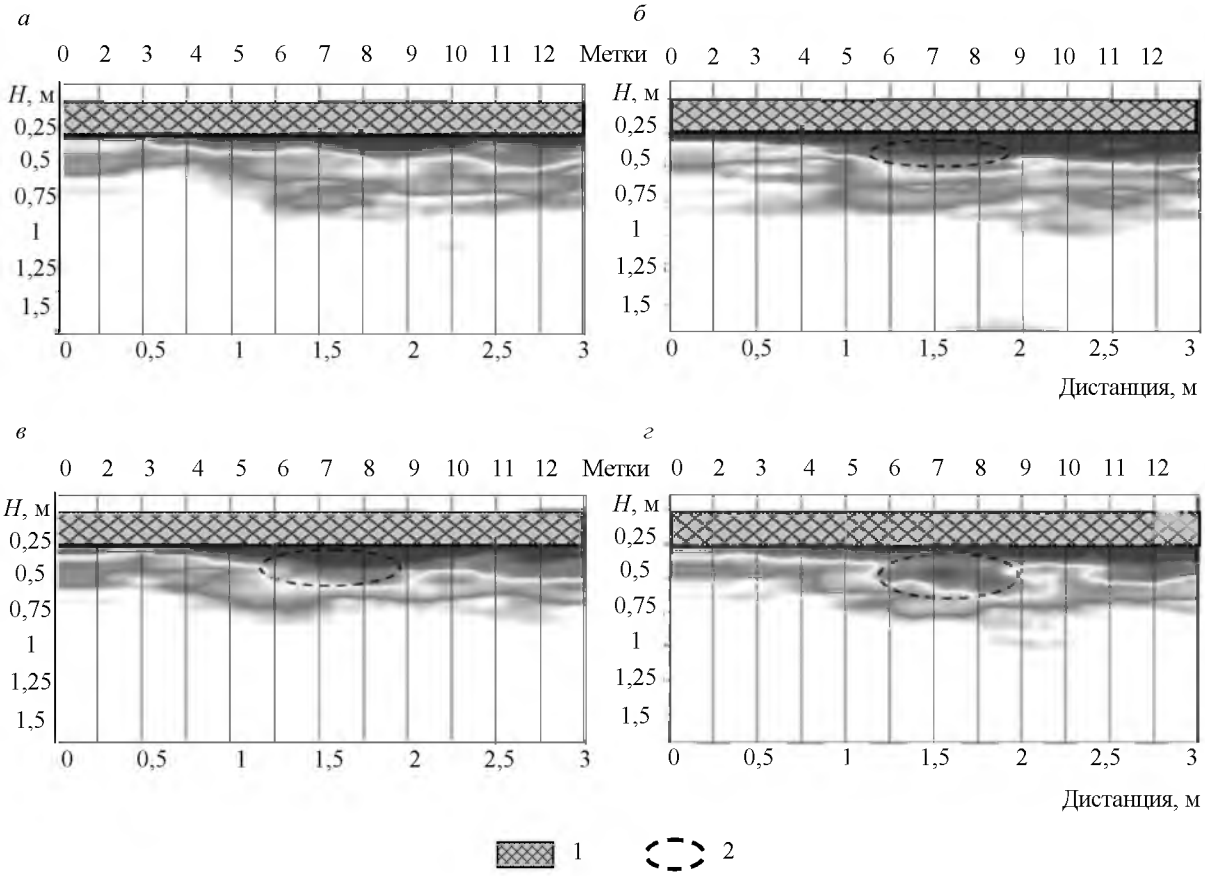


Рис.4. Георадиолокационные разрезы искусственной пустоты на участке 2: *а*, *б*, *в* и *г* – при глубине полости соответственно 0, 15, 25 и 35 см

1 – плита; 2 – контуры пустоты

диолокационного зондирования на центральной частоте 2 ГГц обеспечивает надежную регистрацию возмущений волнового поля пустот глубиной более 20 см. Пространственные характеристики аномалий волнового поля позволяют оценивать размеры и форму пустоты. Чувствительность метода георадиолокации позволяет также осуществлять мониторинг пустот, формирующихся и развивающихся на участках земляного откоса, где происходят скрытые и негативные для эксплуатационной надежности плотин процессы.

Отечественный и зарубежный опыт показывают, что метод георадиолокации является активно развивающимся и перспективным методом, способным повысить эффективность технической диагностики состояния гидротехнических сооружений.

Выполненные работы подтвердили целесообразность применения метода георадиолокации для выявления полостей и зон разуплотнения грунта под железобетонными плитами крепления откоса. Не вызывает сомнения, что использование георадиолокационных технологий при мониторинге гидротехнических сооружений будет продолжаться. Периодическое получение новых георадиолокационных разрезов и их сравнение с предыдущими результатами георадарного зондирования по одним и тем же профильным линиям позволят оперативно и своевременно выделять участки плотин, подверженные негативным процессам.