

## Георадарный метод обнаружения водонасыщенных слоев грунта с оценкой их объемной влажности

© В. Г. Сугак, О. А. Овчинкин, Ю. С. Силаев, А. В. Сугак, 2014

Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков, Украина  
Поступила 11 февраля 2013 г.

*Представлено членом редколлегии Э. Д. Кузьменко*

Розглянуто георадарний метод виявлення локальних зон ґрунтових вод у верхніх шарах ґрунту (до 20—30 м) з оцінкою їх об'ємної вологості стосовно зондувального сигналу з покровою зміною його несучої частоти. Метод засновано на застосуванні фазової структури відбитих сигналів, характеристики якої значною мірою визначаються об'ємною вологістю порід ґрунту. Ефективність методу оцінено на практичному прикладі виявлення насичених водою шарів ґрунту на глибинах до 20 м і підтверджено даними буріння та лабораторних випробувань.

**Ключові слова:** георадар, радіолокатор підповерхневого зондування, зона аерації, водонасичені шари, об'ємна вологість.

**Введение.** Задачи обнаружения и картографирования зон залегания грунтовых вод всегда представляли значительный интерес в народном хозяйстве. Во-первых, вода необходима для жизнедеятельности человека, во-вторых, развивающиеся в последние годы процессы подъема уровня грунтовых вод (подтопление) требуют своевременного их мониторинга с целью предотвращения техногенных последствий.

Грунтовые воды залегают не сплошным водным слоем, а пропитывают собою какую-нибудь породу (песок, суглинок, лесс и т. п.), всю или часть, образуя так называемый водоносный слой или ярус, большей частью непрерывный на значительной площади. Мощность водоносного горизонта и степень насыщенности водой крайне разнообразны и иногда достигают значительных величин.

Поверхность грунтовых вод редко бывает горизонтальной; чаще она волниста, образует всевозможные мутьды, выпуклины и т. п. Циркуляция вод в основном слабая, хотя при особо благоприятных условиях (ноздраватости, трещинах в водоносной породе и т. п.) возможны быстрые подземные течения как сплошные, так и жильные [Лебедев, 1936].

Движение грунтовых вод определяется степенью водопроницаемости пород, которая колеблется в значительных пределах. Пределы изменения коэффициента фильтрации достигают нескольких порядков. Например, в работе [Полубаринова-Кочина, 1952] все горные

породы делятся на пять категорий по степени водопроницаемости:

1) хорошо водопроницаемые (галечники, крупнозернистые пески, массивные сильно-трещиноватые и пещеристые породы) с коэффициентом фильтрации больше 10 м/сут;

2) водопроницаемые (пески, трещиноватые породы) с коэффициентом фильтрации 10—1 м/сут;

3) слабоводопроницаемые (мергели, песчаники, супеси) с коэффициентом фильтрации 1—0,01 м/сут;

4) весьма слабопроницаемые или полупроницаемые (глинистые песчаники, супеси, суглинки) с коэффициентом фильтрации 0,01—0,001 м/сут;

5) непроницаемые, практически водоупорные породы (глины, нетрещиноватые скальные породы и др.) с коэффициентом фильтрации менее 0,001 м/сут.

Таким образом, чрезвычайно разнообразная структурная конфигурация водоносных горизонтов и их различие в фильтрационных характеристиках весьма осложняет и удорожает их поиск стандартными методами инженерной геологии, а именно бурением контрольно-наблюдательных скважин, количество которых может быть значительным.

В качестве альтернативных методов поиска водоносных горизонтов можно предложить георадарные методы, которые в последнее время находят широкое применение в инженерной геологии.

Трудность использования георадарного метода зондирования с целью обнаружения водоносных горизонтов состоит главным образом в том, что их верхняя граница не является резко выраженной, а плавно изменяется по объемной влажности от полного насыщения пор вблизи водоупорной границы до значения в верхнем слое грунта, соответствующего естественному ненасыщенному влагой состоянию. Другими словами, над зеркалом грунтовых вод располагается зона капиллярного поднятия, в которую по капиллярным порам затянута капиллярная вода.

Высота капиллярного поднятия в среднерезнистых песках равна 0,15—0,35 м, в мелкозернистых — 0,02—1,0 м, в супесях она возрастает до 1—1,5 м, в суглинках — до 3—6,5 м [Климентов, Богданов, 1977]. В глинах вода может подниматься, согласно работе [Коссович, 1916], на высоту до 8 м, а в лессах — до 4 м (за два года). В зависимости от особенностей минералогического состава и степени окатанности песчаных частиц высота капиллярного поднятия будет неодинакова даже при одинаковой степени дисперсности, поскольку различный минералогический состав и форма частиц обуславливают различную величину пор и соответственно пористость и оказывают влияние на взаимодействие воды с минеральными частицами. Высота капиллярного поднятия воды в грунтах зависит от многих причин, в том числе от первоначального состояния их увлажнения. Согласно работе [Дранников, 1964], высота капиллярного подъема воды колеблется от 2 до 60 см в песках (в зависимости от крупности зерна), в супесях — от 60 до 120 см, суглинках — от 120 до 160 см и глинах — от 300 до 400 см. В работе [Климентов, Богданов, 2008] приведена таблица высоты капиллярного поднятия воды в зависимости от размера частиц пород, согласно которой эта высота для песчаной фракции колеблется от 8,4 до 101,2 см.

По нашим экспериментальным данным измерения диэлектрической проницаемости пород грунта в лизиметре [Сутак, Кузьмин, 2008], которые проводились в процессе постепенного водного насыщения породы, мощность зоны капиллярного поднятия достигает 15—20 см в песке и 40—50 см в суглинке.

Таким образом, даже в песках зона капиллярного поднятия воды может достигать 1 м и более. Так как длина радиоволн, применяемых для зондирования на глубину до 15—20 м, обычно не превосходит 1 м, то эта зона представляет собой слабоотражающую границу

вследствие плавного изменения диэлектрических свойств (особенно удельной проводимости), сопровождающегося нарастанием затухания радиоволн. Это приводит к тому, что обычные радиояркие изображения сечения грунта, получаемые при использовании таких зондирующих сигналов, как радиопульсный или со ступенчатым изменением его несущей частоты, являются малоэффективным инструментом для определения верхней границы водонасыщенного горизонта. Об этом свидетельствуют немногочисленные публикации по этой тематике. С помощью георадарного метода можно определять уровень залегания грунтовых вод только в песчаных грунтах [Золотарев и др., 1982]. Иногда удается косвенно увидеть размытую верхнюю границу насыщенного водой слоя по резкому возрастанию затухания радиоволн в таких слоях. Однако сделать какие-либо выводы о степени насыщения грунтовыми водами водопроницаемых слоев практически невозможно. Публикации по практическому использованию георадарного зондирования в инженерной геологии в основном касаются вопросов, связанных с зондированием слоев грунта до уровня грунтовых вод или зондированием в пресных водоемах для определения их водоупорных границ (дна) [Ground..., 2004]. В серии работ [Ground..., 2003] подробно описаны результаты применения георадаров для зондирования в осадочных породах и лишь в отдельных работах этой серии косвенно приводятся результаты зондирования в насыщенных водой породах грунта. Хорошим методическим пособием с практическими примерами использования георадарного зондирования служит монография [Владов, Старовойтов, 2004], где приведены многочисленные результаты георадарного зондирования в различных породах грунта с подробным описанием методики и приемов интерпретации данных, в том числе и некоторые примеры определения уровня грунтовых вод. В работе [Шуман и др., 2008] демонстрируется эффективность комплекса геоэлектрических методов, таких как метод становления короткоимпульсного поля (СКИП), вертикального электрорезонансного зондирования (ВЭРЗ) и георадарного зондирования при решении инженерно-геологических задач, которые увеличивают вероятность правильной интерпретации результатов зондирований.

Разработанный нами метод использования фазовой структуры сигналов в георадарном методе зондирования на основе зондирую-

щего сигнала со ступенчатым изменением его несущей частоты может оказаться эффективным инструментом для определения таких слабовыраженных границ, как граница уровня грунтовых вод [Sugak, Sugak, 2010] и самих слоев с оценкой их объемной влажности. Оказалось, что фазовая структура сигналов очень чувствительна к даже небольшим изменениям электрических характеристик подповерхностной структуры грунта (ПСГ), в том числе обусловленных изменением влажности этой структуры. Другим важным преимуществом фазовой структуры сигналов является то, что она позволяет определять не только границы между слоями с разным литологическим составом, но и определять толщину слоев, так как эта структура сохраняет свои свойства во всем сравнительно однородном слое.

**Краткое описание метода обработки сигналов с использованием их фазовой структуры.** Как показано в работе [Sugak, Sugak, 2010], фазовая структура сигналов (ФСС), определяемая их фазочастотным спектром, очень чувствительна к физическим характеристикам среды, в частности к объемной влажности и типу грунта. В этой же работе показано, что ФЧС отраженных от неоднородностей ПСГ и прошедших слои грунта сигналов определяется выражением, в котором фазовый множитель  $\Delta\Phi$  определяет зависимость ФЧС от физических свойств среды в каждом дискретном значении глубины  $r_n$ , определяемым разрешающей способностью зондирующего сигнала:

$$\Phi(r_n) = r_n \Delta\Phi, \quad \Delta\Phi = \frac{1}{8} \frac{\sigma^2 \sqrt{\mu}}{(f_0 + \Delta f) \sqrt{\epsilon \epsilon}}. \quad (1)$$

В этих выражениях  $r_n$  — текущее значение дискретной глубины,  $n$  — номер дискретного значения несущей частоты зондирующего сигнала,  $f_0$  — начальное значение несущей частоты,  $\Delta f$  — дискретное изменение несущей частоты,  $\sigma$  — удельная проводимость пород грунта,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость пород грунта,  $\mu$  — магнитная проницаемость пород.

Таким образом, если физические характеристики ПСГ не изменяются с глубиной, то ФЧС линейно зависит от глубины (или частоты). Скорость нарастания по глубине этой составляющей (градиент) определяется характеристиками среды. Как видно из выражения (1), основной вклад в эту добавку вносит удельная проводимость среды, так как она входит в квадрате в выражение (1), в то время как диэлектрическая проницаемость — только в степени

3/2. Это обстоятельство дает дополнительный положительный эффект — более высокую чувствительность ФЧС к изменению влажности породы грунта.

На рис. 1 показаны кривые, характеризующие зависимость постоянного фазового коэффициента, который входит множителем дискретного значения глубины, от объемной влажности. Каждая кривая соответствует определенному типу грунта, который характеризуется процентным содержанием песчаной и глинистой фракций. На рис. 2 приведены данные моделирования в виде нарастающих линейных зависимостей фазового набега от глубины

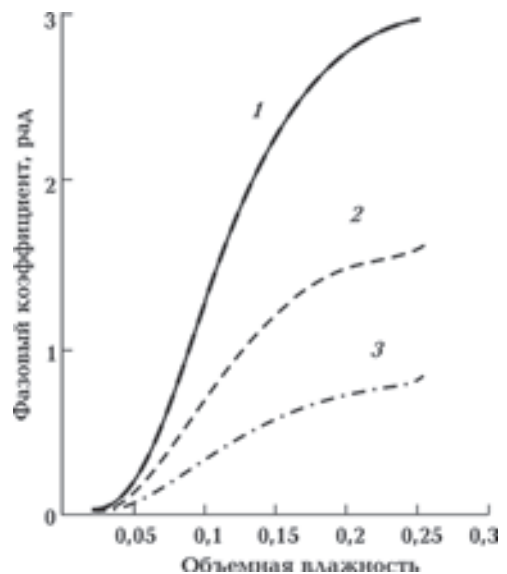


Рис. 1. Зависимость фазового коэффициента от влажности: 1 — песок 30 %, глина 70 %; 2 — песок 50 %, глина 50 %; 3 — песок 70 %, глина 30 %.

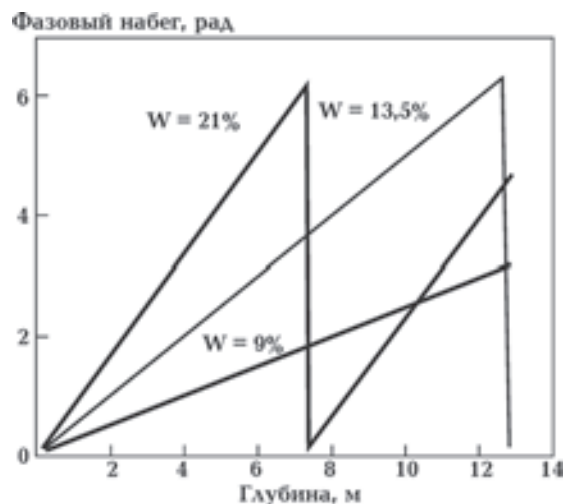


Рис. 2. Линейные зависимости фазового набега от глубины при разной влажности породы грунта.

при разной влажности породы слоя грунта. Для данного случая была выбрана порода, содержащая 70 % песчаной фракции и 30 % глинистой. Видно, что фазовый коэффициент и скорость нарастания ФЧС очень сильно зависят от типа грунта и объемной влажности.

Аналогично представлению информации о результате подповерхностного зондирования в виде радиояркого изображения сечения грунта по профилю движения георадара можно представить и изображение фазой структуры сигналов. При таком же способе представления изображения фазовой структуры сигналов показываются в виде кривых, соответствующих максимумам фазовых сдвигов (например, значениям  $+2\pi$ ), располагающихся сравнительно периодически по глубине. При наличии локальных зон или слоев грунта, в которых фазовая скорость распространения радиоволн отличается от окружающей структуры грунта, будут наблюдаться смещения положения этих максимумов по глубине за счет изменения градиента роста фазы отраженного сигнала.

Для того, чтобы связать характеристики фазовой структуры георадарных сигналов с физическими характеристиками пород грунта, необходимо иметь адекватные им модели электрических характеристик основных пород грунта. В идеале модель должна учитывать влияние множества различных факторов на диэлектрические свойства грунта. Такими факторами являются объемная плотность грунта, текстура, композиционные свойства (распределение размера частиц и их минералогия), объемная концентрация водных компонентов (обычно в виде свободной и связанной воды), воздух, степень солености и температура [Scott, Smith, 1992].

Модель, использованная в данной работе, является разновидностью широко используемых моделей, основанных на смесях различных пород грунта, в основном песка, глины и ила (осадочных пород), воды в разных состояниях (например, связанной и свободной), воздуха и соляного раствора. Это так называемая 4-компонентная модель, описание которой подробно изложено в работе [Сугак и др., 2012]. Для аппроксимации реально встречающихся пород грунта широко применяется треугольная диаграмма текстурных классов грунта [Ground..., 2004] для определения процентного состава композитных пород для требуемого типа грунта.

При расчетах использовалась скорректированная модель, в которой были изменены наклон частотных зависимостей диэлектрической проницаемости и удельной проводимости таким

образом, чтобы результаты были более близкими к наблюдаемым экспериментальным данным [Сугак и др., 2012]. Для этого получаемая в результате расчета по указанной модели функция зависимости диэлектрической проницаемости и удельной проводимости грунта от частоты умножалась на множители  $K(\omega) = (\omega_0/\omega)^{\text{deg}r1}$ ,  $K(\omega) = (\omega_0/\omega)^{\text{deg}r1}$  соответственно, где  $\omega_0$  — начальная частота зондирующего сигнала,  $\text{deg}r1$  и  $\text{deg}r2$  — показатели степени, величины которых варьируются в пределах 0,7...0,9 и 0,5...0,6 соответственно. В итоге расчетные результаты по общему затуханию, частотной зависимости погонного затухания и частотной дисперсии диэлектрической проницаемости получались более адекватными заданному типу грунта.

Для получения распределения объемной влажности по глубине в заданном сечении грунта использовался комплекс методов:

- анализ изображений фазовой структуры грунта,
- использование априорной информации о типе пород грунта,
- расчет частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости пород грунта,
- моделирование процессов распространения радиоволн в слоях грунта [Sugak, 2007].

Далее один из основных параметров модели — объемная влажность — методом итераций подбирался так, чтобы расчетные данные о расстоянии между соседними изолиниями фазовой структуры грунта (крутизне фазочастотной характеристики) совпадали бы с данными зондирования (на изображении с фазовой структурой сигналов вдоль профиля в заданных его сечениях).

**Применение метода в реальной задаче обнаружения подповерхностных водоносных слоев.** Рассмотрим результаты применения описанного метода использования фазовой структуры георадарных сигналов на примере выявления водоносных слоев в пос. Роговка (Валковский р-н, Харьковской обл., Украина).

Геологическая структура почвы в этом районе очень неоднородна, что проявляется в крайне неравномерном распределении водоносных слоев в подповерхностной структуре грунта этого региона. В поселке существует единичные места, в которых можно добывать воду из колодцев с глубины порядка 14—16 м. По-видимому, эта вода фильтруется по водопроницаемым слоям (языкам) относительно

небольшими в поперечном сечении, из источников в виде нескольких озер, располагающихся севернее на расстоянии около 0,7—1,0 км от поселка (рис. 3). Выявление таких водоносных слоев является очень важным для жителей поселка.

Для анализа был выбран длинный профиль

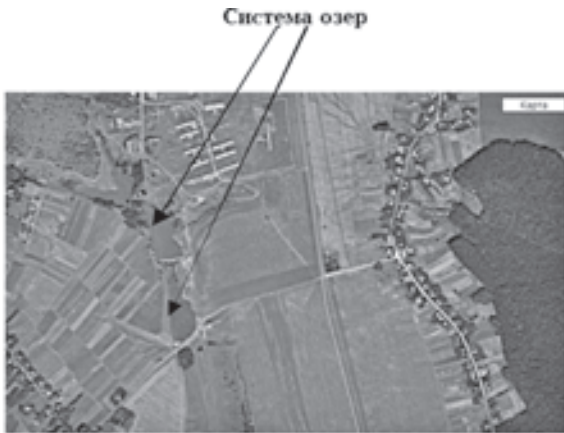


Рис. 3. Карта участка в окрестности пос. Роговка.



Рис. 4. Увеличенный масштаб участка.

движения георадара, который начинался в окрестности расположения действующего колодца и простирался на длину около 230 м (рис. 4). Такой выбор профиля диктовался необходимостью сравнения георадарных данных, получаемых при пересечении водоносного слоя, из которого питается действующий колодец, с данными, получаемыми вдоль всего профиля движения георадара. Детальное описание принципа работы георадара со ступенчатым изменением его несущей частоты можно найти в работе [Сугак и др., 2005]. В данном

случае при зондировании использовался частотный диапазон примерно 100—160 МГц.

Анализируя детально изображение фазовой структуры сигналов по указанному профилю (рис. 5), можно сделать следующие выводы. На изображении можно выделить четыре характерные зоны.

Первая зона — верхний слой почвы до глубины около 2 м, характеризуется сравнительно однородной структурой грунта.

Вторая зона — слой почвы от 2 м до примерно 8 м. Здесь можно выделить сравнительно однородный участок (слой), располагающийся на дистанции от примерно 100 м от начала профиля до 200 м.

Третья зона — слой почвы на глубине от 8 до примерно 21 м на этом же участке, также характеризуется сравнительно однородной структурой.

Наиболее интересными с точки зрения анализа являются три зоны, обозначенные цифрой 4, выделенные на рисунке пунктирными линиями, и зона под номером 3. Первая из них начинается с глубины примерно 10 м и находится на расстоянии от 20 до 100 м от начала профиля. По-видимому, эта зона соответствует водонасыщенному слою, из которого наполняется указанный выше колодец с водой.

Вторая зона располагается в конце профиля и на глубине более 12—14 м характеризует второй, предположительно водонасыщенный слой грунта (язык), который может представлять интерес с точки зрения добычи питьевой воды (такой вывод будет подкреплён дальнейшим анализом).

В этих зонах наблюдается существенный подъем изолиний фазовой структуры сигналов на глубине от 11 до 17—20 м. Здесь присутствует также сильная изрезанность фазовой структуры грунта, что может быть связано с большим количеством локальных неоднородностей в структуре грунта и, как следствие, с большими неоднородностями по степени увлажнения грунта.

В третьей зоне наблюдается существенно более однородная структура грунта с постепенным уменьшением расстояния между изолиниями, начиная с глубины 13 м, что характеризует однородно увлажненный слой на этих глубинах.

Для перехода к численным оценкам объемной влажности этих зон необходима информация о литологическом строении и физических характеристиках пород грунта этих зон и величин отклонений по глубине соответствующей

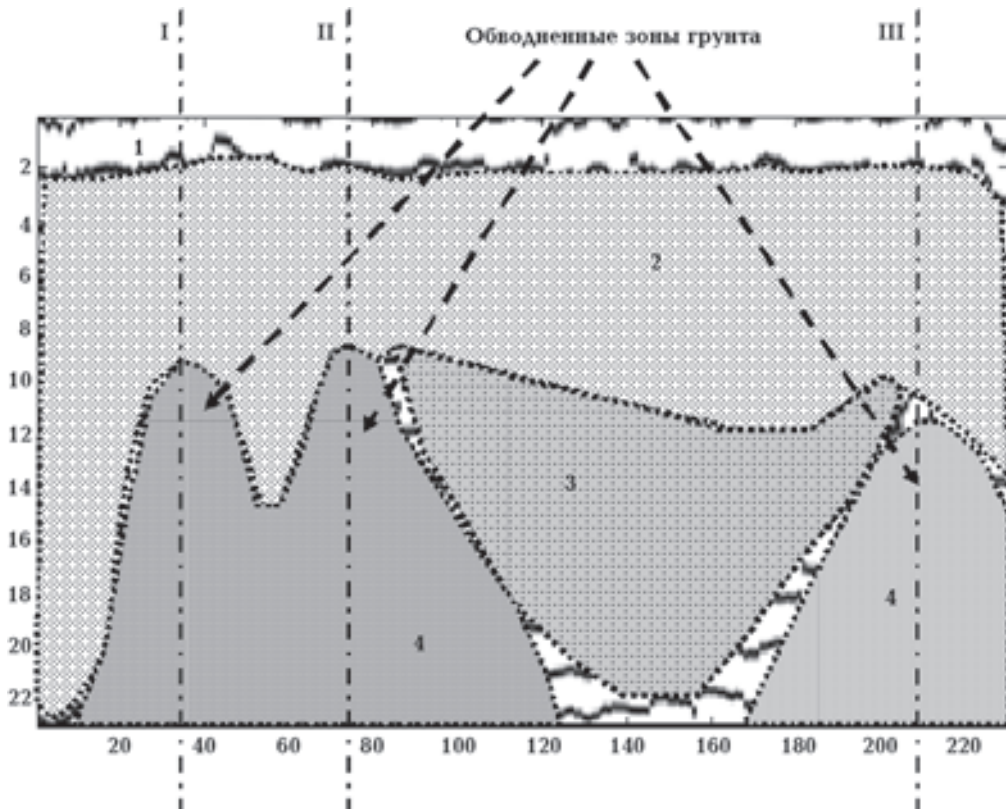


Рис. 5. Фазовая структура сигналов по профилю движения георадара.

щих изолиний фазовой структуры сигналов, а также указанная выше модель электрических характеристик различных грунтов. Для этого более детально анализировалась фазовая структура сигналов на той части профиля, которая представляла наибольший интерес с точки зрения наличия водоносных слоев грунта. Такая зона, где отчетливо видна неоднородность изолиний фазовой структуры сигналов с существенно разными градиентами скорости нарастания, показана на рис. 6.

Определение типа грунтов осуществлялось бурением вручную контрольной наблюдательной скважины в окрестности второй водонасыщенной зоны, т. е. на расстоянии около 220 м от начала профиля (табл. 1).

Для дальнейшего анализа использовалась типовая классификация грунтов по содержанию глинистых и песчаных фракций. По процентному содержанию глинистых частиц различают глины, суглинки и супеси, а по размерам песчаных частиц — глинистые, глинисто-пылеватые грунты [Полубаринова-Кочина, 1952]. Классификация глинистых грунтов по зерновому составу, принятая, например, в дорожном деле, приведена в табл. 2.

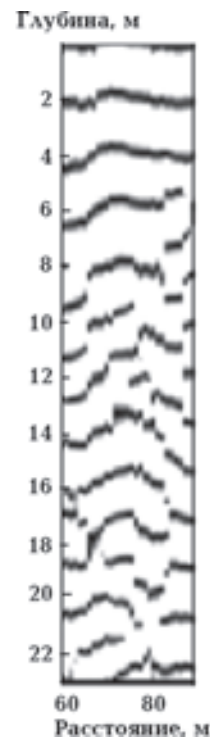


Рис. 6. Фазовая структура сигнала в окрестности сечения II по профилю движения георадара.

Таким образом, породы грунта из контрольно-наблюдательной скважины в нашем случае (пылеватая глина) должны иметь процентное содержание глинистой фракции более 30 %.

Далее, используя указанную выше модель зависимости электрических характеристик пород грунта от процентного содержания песчаной и глинистой фракций, влаги, пористости, температуры и т. д., было проведено моделирование распространения зондирующего сигнала со ступенчатым изменением частоты через среду, параметры которой варьировались так, чтобы результаты моделирования совпадали по возможности с данными зондирования. При моделировании использовались два типа грунта в соответствии с табл. 2. В первом случае процентное содержание песчаной фракции со-

ставляло 30 %, а во втором — 40 %. Понятно, что при одинаковом расстоянии между изолиниями фазовой структуры грунта объемная влажность будет больше для второго случая, а именно для грунта с большим процентным содержанием песчаной фракции. Моделирование начиналось с анализа информации о зависимости расстояния между изолиниями фазовой структуры сигналов по глубине для двух выбранных зон (рис. 7). Затем с использованием указанной выше модели электрических характеристик пород грунта и полученной информации о зависимостях расстояния между изолиниями фазовой структуры от глубины проводился подбор объемной влажности выбранных типов пород грунта так, чтобы результаты моделирования совпадали с данными зондирования.

**Т а б л и ц а 1. Описание типов пород грунта из пробуренной скважины**

Глубина, м	Характеристика грунта
0,5	Слой чернозема
4,5—5,5	Глина пылеватая светлая среднезернистая, комковатая, с включениями известковых пород, сухая
6,5	То же, но более темная
7,5	То же, но еще более темная
8	Глина пылеватая, тяжелая, полутвердая, с небольшими примесями песка, темно-коричневая, комковатая, с включениями твердых образований в виде комков известняка (диаметром от 1 до 3—5 см)
10,5	То же
11	Глина пылеватая темно-коричневая, комковатая, с включениями известковых комков, влажная
12	То же, насыщенная влагой
15	То же

**Т а б л и ц а 2. Классификация глинистых грунтов по зерновому составу и содержанию фракций**

Порода	Размеры частиц, мм		
	Глинистые 0,002	Пылеватые 0,002—0,05	Песчаные 0,5—2,0
	<i>Глинистые грунты</i>		
Глина	более 30	—	Больше, чем пылеватых
Суглинок	30—10	—	
Супесь	10—3	—	
	<i>Глинисто-пылеватые грунты</i>		
Пылеватая глина	более 30	Больше,	—
Пылеватый суглинок	30—10	чем	—
Пылеватая супесь	10—3	песчаных	—

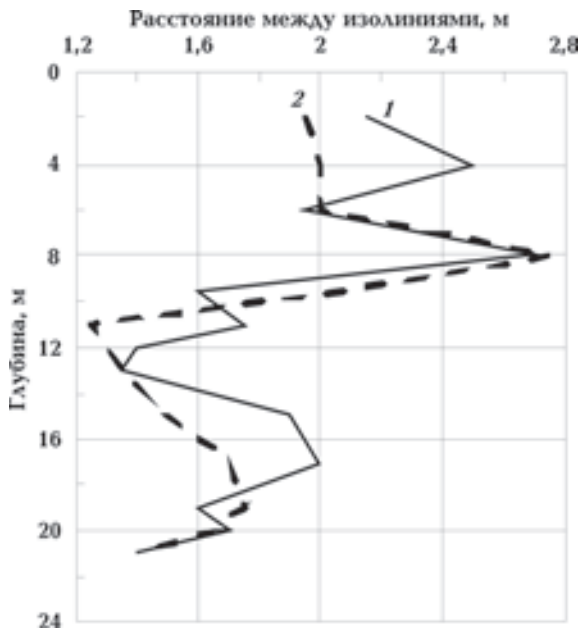


Рис. 7. Зависимость расстояния между изолиниями от глубины: 1 — первая зона; 2 — вторая зона.

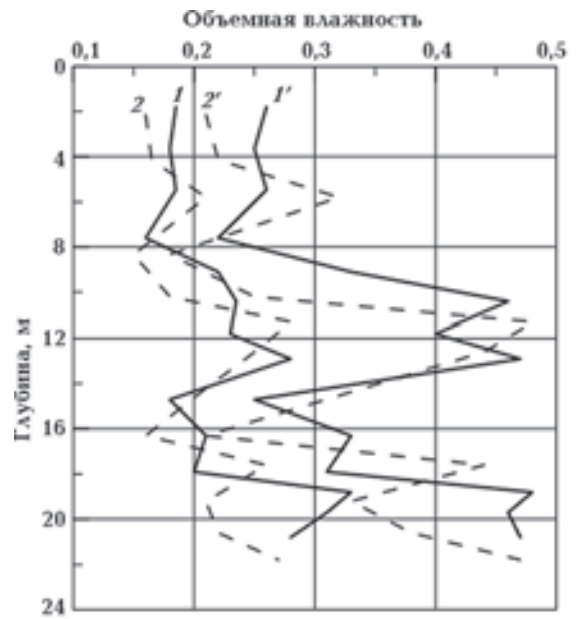


Рис. 8. Распределение объемной влажности в двух сечениях грунта I (сплошные линии) и II (пунктирные) по профилю движения георадара (см. рис. 5): 1, 2 — процентное содержание песчаной фракции 30 %; 1', 2' — процентное содержание песчаной фракции 40 %.

На рис. 8 и 9 приведены результаты моделирования для выбранных трех зон подповерхностной структуры грунта (см. выше). Для каждой зоны приведены две кривые распределения объемной влажности по глубине, одна из них соответствует процентному содержанию песчаной фракции 30 %, а вторая — 40 %. Можно предположить, что для указанного типа грунта реальные кривые будут соответствовать какому-то промежуточному случаю. Так как нашей задачей было определение зон повышенной влажности для возможного в будущем рытья колодца, то такой точности определения объемной влажности в принципе достаточно.

К сожалению, мы не обладали априорной информацией о типах пород грунта, в которых происходила фильтрация влаги. Дело в том, что в реальной ситуации фильтрация влаги из зон расположения указанных озер должна осуществляться по грунтам с большим значением коэффициента фильтрации, т. е. по тем породам, в которых больше содержание песчаной фракции. Поэтому такие породы грунта будут ближе к кривым с 40 %-ным содержанием песчаной фракции или больше.

Из анализа рисунков видно, что в двух наиболее подходящих для фильтрации воды породах грунта (см. рис. 8) наблюдается большая изрезанность фазовой структуры грунта, что проявляется в больших скачках объемной влажности по глубине. Это свидетельствует

в пользу того, что именно здесь происходит основная фильтрация влаги, так как такие породы грунта должны характеризоваться большей неоднородностью структуры грунта (наличие включений различных пород грунта с разными значениями плотности и коэффициента фильтрации). Наш опыт зондирования таких структур (например, зондирование откоса плотины дамбы Дубоссарской ГЭС [Сугак, 2010]) показывает, что именно в таких слоях наблюдается сильная изрезанность фазовой структуры радиолокационных сигналов. В пользу такого вывода говорит также то, что максимальные значения объемной влажности в этих зонах превосходят соответствующие значения в любых других зонах. Из двух указанных зон несколько меньшая мощность слоя обводнения наблюдается во второй зоне (сечение № 3). Мощность этого слоя не превышает 3 м (глубина примерно от 9,5 до 12,5 м), в то время как в первой зоне мощность этого слоя превышает 4 м (глубины 9—13 м).

В зоне № 3 (рис. 9) наблюдается сравнительно большая однородность фазовой структуры сигналов. При этом объемная влажность увеличивается с глубиной и достигает меньшего максимума, приходящегося на глубину около 17—19 м. Вследствие существенно более однородной фазовой структуры сигналов на протя-



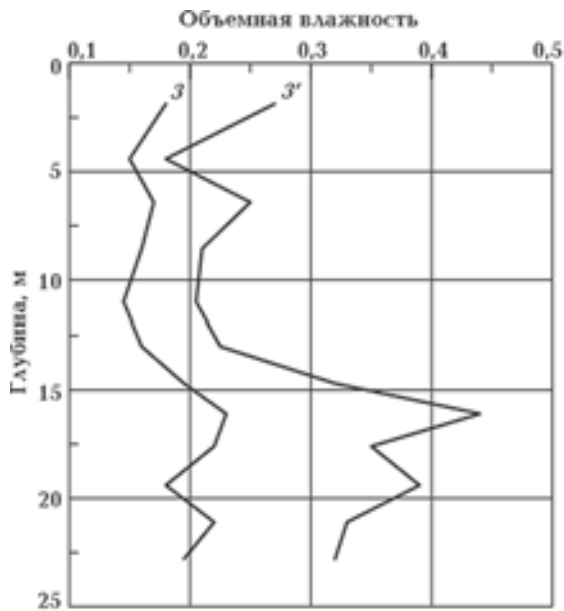


Рис. 9. Распределение объемной влажности в сечении III по профилю движения георадара (см. рис. 5): 3 — процентное содержание песчаной фракции 30 %; 3' — процентное содержание песчаной фракции 40 %.

жении всей этой зоны можно сделать вывод о том, что грунт здесь имеет также сравнительно однородную структуру с большим содержанием

### Список литературы

Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2004. 154 с.

Дранников А. М. Инженерная геология. Киев: Гос. изд-во литературы по строительству и археологии УССР, 1964. 256 с.

Золотарев В. П., Кофман Л. М., Сыяев Г. Н., Финкельштейн М. И. Измерение глубины залегания уровня грунтовых вод в песчаных отложениях методом радиолокационного зондирования. *Водные ресурсы*. 1982. № 4. Р. 176—179.

Климентов П. П., Богданов Г. Я. Общая гидрогеология. Москва: Недра, 1977. 357 с.

Коссович П. С. Краткий курс общего почвоведения. 2-е изд. Петроград: Типография Альтшулера, 1916. 276 с.

Лебедев А. Ф. Почвенные и грунтовые воды. Москва: Изд-во АН СССР, 1936. 316 с.

Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. Москва: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1952. 678 с.

ем глинистой фракции, препятствующей фильтрации влаги по этой породе.

**Выводы. 1.** В работе методологически, экспериментально и теоретически обоснован метод георадарного обнаружения водоносных слоев грунта на глубине до 25 м, основанный на использовании зондирующего сигнала со ступенчатым изменением его несущей частоты и фазовой структуры отраженных сигналов. В методе используется связь между крутизной нарастания фазочастотного спектра сигналов и физическими характеристиками пород грунта.

2. Разработана методика расчета распределения объемной влажности по глубине, полученного из радиолокационных данных с использованием моделей электрических характеристик пород грунта. Методика основана на итерационных процедурах подбора значения объемной влажности при расчете фазовой структуры радиолокационных сигналов при известных процентных содержаниях глинистой и песчаной фракций.

3. Показана перспективность данного метода для решения задач инженерной геологии, в частности обнаружения и картографирования зон залегания подповерхностных грунтовых вод и верховодок.

Сугак В. Г., Бондаренко И. С., Сугак А. В. О противоречии данных подповерхностного зондирования теоретическим моделям диэлектрических характеристик пород грунта. *Радиофизика и электроника*. 2012. Т. 3. № 1. С. 19—29.

Сугак В. Г., Букин А. В., Пегенко Ю. А., Овчинкин О. А., Силаев Ю. С. Применение специализированного георадиолокатора в задачах инженерной геологии, гидрогеологии и экологии. *Наука та інновації*. 2005. Т. 1. № 2. С. 32—43.

Сугак В. Г., Кузьмин В. В. Динамика электрических характеристик грунтов при изменении режимов инфильтрации влаги и загрязняющих нефтепродуктов в условиях, близких к естественным. *Вестник Днепропетровского ун-та. Сер. Физика. Радиоэлектроника*. 2008. Вып. 15. № 2/1. С. 89—99.

Сугак В. Г. Дубоссарская ГЭС. Радиофизическое зондирование откоса плотины радиолокатором подповерхностного зондирования «Сканирующий георадар». Отчет по хозяйственной НИР «Днепр», Харьков, ИРЭ им. А. Я. Усыкова НАН Украины, инв. № 02.10U007056. 2010.

- Шуман В. Н., Левашев С. П., Якимчук Н. А., Корчагин И. Н. Радиоволновые зондирующие системы: элементы теории, состояние и перспективы. *Геоинформатика*. 2008. № 2. С. 22—50.
- Ground Penetrating Radar (Ed. D. J. Daniels), 2004. 2nd Edition. London: Institute of Electrical Engineers Publ., 723 p.
- Ground Penetrating Radar in Sediments (Eds C. S. Bristow, H. M. Jol), 2003. London: Geol. Soc. Publ. House, Spec. Publ. 211, 338 p.
- Scott W. R., Smith G. S., 1992. Measured electrical constitutive parameters of soil as functions of frequency and moisture content. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 30, 621—623.
- Sugak V. G., 2007. Particularities of Signal Processing at Subsurface Radar Sounding in Dispersive Media. *Telecommunication and Radio Engineering* 66(16), 1425—1440.
- Sugak V. G., Sugak A. V., 2010. Phase Spectrum of Signals in Ground Penetrating Radar Applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 48, 1760—1767.

## Geo-radar method of revealing water-saturated ground layers with evaluation of their three-dimensional humidity

© V. G. Sugak, O. A. Ovchinkin, Yu. S. Silayev, A. V. Sugak, 2014

Geo-radar method of revealing ground water local zones in upper ground layers (up to 20—30 m) with evaluation of their three-dimensional humidity concerning the sounding signal with stepwise alteration of its carrier frequency has been considered. The method is based on phase structure of reflected signals which characteristics are determined to essential degree by three-dimensional humidity of ground rocks. Effectiveness of the method was evaluated by practical example of revealing water-saturated ground layers at the depths up to 20 m and was confirmed by the data of drilling and laboratory tests.

**Key words:** geo-radar, radio-locator of subsurface sounding, aeration zone, water-saturated layers, three-dimensional humidity.

### References

- Vladov M. L., Starovojtov A. V., 2004. *Introduction to the GPR*. Moscow: MSU Publ., 154 p. (in Russian).
- Drannikov A. M., 1964. Engineering geology. Kiev: State Publ. Literature on Construction and Archeology of the Ukrainian SSR, 256 p. (in Russian).
- Zolotarev V. P., Kofman L. M., Syjaev G. N., Finkel'shtejn M. I., 1982. Measuring the depth of the groundwater level in sandy sediments by radar sounding. *Vodnye resursy* (4), 176—179 (in Russian).
- Klimentov P. P., Bogdanov G. Ja., 1977. General hydrogeology. Moscow: Nedra, 357 p. (in Russian).
- Kossovich P. S., 1916. Short course of general soil science. 2nd ed. Petrograd: Typography Altshuler, 276 p. (in Russian).
- Lebedev A. F., 1936. Soil and groundwater. Moscow: Publ. House of the USSR Academy, 316 p. (in Russian).
- Polubarinova-Kochina P. Ja., 1952. The theory of groundwater motion. Moscow: State Publ. Technical and Theoretical Literature, 678 p. (in Russian).
- Sugak V. G., Bondarenko I. S., Sugak A. V., 2012. About contradiction subsurface sensing data to theoretical models of the dielectric characteristics of rocks soil. *Radiofizika i jelektronika* 3(1), 19—29 (in Russian).
- Sugak V. G., Bukin A. V., Pedenko Ju. A., Ovchinkin O. A., Silaev Ju. S., 2005. Application georadiolokator specialized in problems of engineering geology, hydrogeology and ecology. *Nauka ta innovacii* 1(2), 32—43 (in Russian).
- Sugak V. G., Kuz'min V. V., 2008. Dynamics of the electrical characteristics of the soil when changing modes moisture infiltration and polluting petroleum products under conditions close to natural. *Vestnik Dnepropetrovskogo un-ta. Ser. Fizika. Radiojelektronika* is. 15(2/1), 89—99 (in Russian).
- Sugak V. G., 2010. Radiophysical sensing dam slope subsurface sounding radar «Scanning GPR». Report on research of economic contracts «Dniester», Kharkov, IRE A. Ya. Usikov NAS of Ukraine, № 02.10U007056 (in Russian).
- Shuman V. N., Levashev S. P., Jakimchuk N. A., Korchagin I. N., 2008. Radiowave sounding system elements

- of the theory, the state and prospects. *Geoinformatika* (2), 22—50 (in Russian).
- Ground Penetrating Radar* (Ed. D. J. Daniels), 2004. 2nd Edition. London: Institute of Electrical Engineers Publ., 723 p.
- Ground Penetrating Radar in Sediments* (Eds C. S. Bristow, H. M. Jol), 2003. London: Geol. Soc. Publ. House, Spec. Publ. 211, 338 p.
- Scott W. R., Smith G. S., 1992. Measured electrical constitutive parameters of soil as functions of frequency and moisture content. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 30, 621—623.
- Sugak V. G., 2007. Particularities of Signal Processing at Subsurface Radar Sounding in Dispersive Media. *Telecommunication and Radio Engineering* 66(16), 1425—1440.
- Sugak V. G., Sugak A. V., 2010. Phase Spectrum of Signals in Ground Penetrating Radar Applications. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 48, 1760—1767.