

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО ГЕОРАДИОЛОКАТОРА В ЗАДАЧАХ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ, ГИДРОГЕОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ

В. Г. Сугак, А. В. Букін, О. А. Овчинкін, Ю. А. Педенко, Ю. С. Сілаєв
Институт радиопластики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины, Харьков

Надійшла до редакції 31.03.05

Резюме: В статье приведены результаты теоретического и экспериментального исследования возможностей подповерхностного радиолокационного зондирования применительно к решению задач инженерно-геологических изысканий - определения глубины уровня грунтовых вод, определения литологического состава грунтов зоны аэрации, глубины залегания и мощности слоя нефтепродуктов, образующегося в результате различного рода техногенных утечек, а также картографирование участков, подверженных оползневому процессам. Показано, что использование сканирующего по частоте радиолокатора успешно решает указанные задачи, обеспечивая ряд существенных преимуществ, как перед традиционными методами геофизических исследований, так и по сравнению с использованием радиолокаторов подповерхностного зондирования с импульсными сигналами.

Ключевые слова: подповерхностное зондирование, радиолокация, георадар, геология, загрязнение почвы, уровень грунтовых вод, нефтяная линза, экология.

В. Г. Сугак, А. В. Букін, О. А. Овчинкін, Ю. А. Педенко, Ю. С. Сілаєв. ЗАСТОСУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ГЕОРАДІОЛОКАТОРА У ЗАДАЧАХ ІНЖЕНЕРНОЇ ГЕОЛОГІЇ, ГІДРОГЕОЛОГІЇ ТА ЕКОЛОГІЇ.

Резюме: У статті наведено результати теоретичного та експериментального дослідження можливостей підповерхневого радіолокаційного зондування стосовно до вирішення завдань інженерно-геологічних робіт - визначення глибини рівня ґрунтових вод, літологічного складу ґрунтів зони аерації, глибини залягання та потужності шару нафтопродуктів, що утворюються в результаті різного роду техногенних витоків, а також картографування ділянок, підданих зсувним процесам. Показано, що використання скануючого по частоті радіолокатора успішно вирішує зазначені завдання, забезпечуючи ряд істотних переваг, як перед традиційними методами геофізичних досліджень, так і у порівнянні з використанням радіолокаторів підповерхневого зондування з імпульсними сигналами.

Ключові слова: підповерхнєве зондування, радіолокація, георадар, геологія, забруднення ґрунту, рівень ґрунтових вод, нафтова лінза, екологія.

V. G. Sugak, A. V. Bukin, O. A. Ovshinkin, Yu. A. Pedenko, Yu. A. Silaev. USE OF SPECIALIZED GROUND PENETRATING RADAR IN TASKS OF ENGINEERING GEOLOGY, HYDROGEOLOGY AND ECOLOGY.

Abstract: In the article it is brought the outcomes of theoretical and experimental research of opportunities of subsurface radar probing for decision of problems of engineering - geological researches - definitions of depth of a level of subsurface water, definitions of soil lithologic section structure of zones of aeration, depth of deposition and thickness of a layer of oil products formed as a result of various sort of man-caused outflow and also mapping of territories subject to landslide process. It is shown, that use of step-by-step radar probing successfully solves the specified problems, providing a number of essential advantages in comparison to traditional methods of geophysical researches, and in comparison with use of radar subsurface probing with pulse signals.

Keywords: underground probing, radiolocation, ground penetrating radar, geology, soil pollution, subsoil waters surface, lens of oil, ecology.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности на современном этапе характеризуется возрастанием техногенного воздействия на окружающую среду. В частности, нарушение инфильтрационного водного режима зоны аэрации (ЗА) приводит к постепенному подъему уровня грунтовых вод и, вследствие этого, к подтоплению промышленных и жилых районов. Часто в таких районах образуется "верховодка" (зона повышенного увлажнения верхних слоев грунта в результате различного рода утечек воды), которую также необходимо вовремя локализовать и устранить причины ее возникновения.

Интенсивными темпами возрастает переработка и транспортировка нефти и нефтепродуктов с использованием трубопроводов, железнодорожных и автомобильных перевозок. Это неизбежно ведет к возрастанию неконтролируемых потерь, что вызывает загрязнение грунта и грунтовых вод зоны аэрации. При значительных масштабах эти загрязнения проявляются в виде линз нефтепродуктов, располагающихся на уровне первых грунтовых вод. Принятие своевременных мер для ликвидации последствий таких загрязнений требует оперативных методов картографирования пространственных границ загрязнений. Особый интерес представляет локализация границ залегания загрязнений на территориях нефтебаз, нефтеперерабатывающих заводов и бывших военных аэродромов.

Одной из важных задач инженерной геологии является картографирование оползней, представляющих значительную угрозу инженерным и строительным сооружениям.

При стандартном методе мониторинга зоны аэрации в таких местах оборудуется сеть контрольно-измерительных скважин. Однако картографирование уровня грунтовых вод и зоны загрязнения требует значи-

тельного количества скважин, что существенно удорожает работы, а бурение скважин в зоне оползней зачастую является и рискованным мероприятием.

Использование метода радиолокационного зондирования грунтов (георадарное зондирование), является одним из наиболее перспективных и динамичных направлений развития геофизических исследований. Основными преимуществами метода являются высокая разрешающая способность, помехоустойчивость по отношению к искажающим сигналам, а также оперативность и экономичность. Кроме того, георадарное зондирование требует минимума пространства для развертывания необходимой аппаратуры, что зачастую является существенным преимуществом при его использовании в условиях плотной городской и промышленной застройки.

Однако, вследствие недостаточной изученности, использование георадарного зондирования в настоящее время ограничено по сравнению с использованием традиционных геофизических исследований. Для решения этой проблемы нами в ряде работ была выполнена теоретическая и экспериментальная оценка возможности применения георадарного зондирования для обнаружения и картографирования подповерхностных скоплений нефтепродуктов техногенного характера, картографирования уровня грунтовых вод и определение пространственной конфигурации и мощности оползня [1, 2, 3].

Целью статьи является обоснование возможности использования георадарного зондирования для решения следующих, весьма важных задач инженерных изысканий: определения глубины уровней грунтовых вод и литологического состава грунтов зоны аэрации, глубины залегания и мощности слоя жидких нефтепродуктов, располагающегося на уровне грунтовых вод, а также – определение пространственной конфигурации и мощности оползневых процессов.

При експериментальному обґрунтуванні використано спеціально розроблений для цих цілей радіолокатор підповерхностного зондування (скануючий георадар). При розробці георадара використано теоретичні та експериментальні дослідження, які проводилися впродовж ряду років ІРЭ НАН України (м. Харків) спільно з ДАР ВОДГЕО (м. Москва) та НТІ ТТР (м. Харків) [1, 2]. Основними напрямками робіт були:

- дослідження залежності електричних характеристик типових ґрунтів від вологості та ступеня насичення нафтопродуктом в діапазоні радіочастот від десятків до сотень мегагерц;
- дослідження динамічних властивостей електричних характеристик типових ґрунтів в лізіметрі при зміні вологості та ступеня насичення нафтопродуктом;
- розробка моделей функціональних залежностей електричних характеристик порід ґрунта в зазначеному вище діапазоні частот від процентного вмісту твердих фракцій, об'єму пор та вологості;
- розробка математичних алгоритмів обробки радіолокаційної інформації, що враховують тонку структуру спектрів сигналів, відбитих від підповерхностних неоднорідних об'єктів;
- розробка методів відновлення фізичних властивостей шарів ґрунта та окремих неоднорідних об'єктів на основі інформації, отриманої в результаті чисельних методів розв'язання рівнянь переносу та дифузії (інфільтраційні процеси в зоні аерації) та чисельних методів розв'язання електродинамічних рівнянь методом кінцевих елементів.

При обробці інформації, отриманої за допомогою георадара, використовувалися спеці-

альні математичні алгоритми, розроблені для визначення електричних характеристик ґрунта, що дозволяють, зокрема, отримати залежності коефіцієнта затухання радіоволн в заданій частотній смузі [3].

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОРАДАРА, ИСПОЛЬЗОВАВШЕГОСЯ ПРИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В основу георадара покладено використання неперервних зондувальних сигналів постійної амплітуди з кроковим змінюванням частоти. Це дозволило, використовуючи відповідні алгоритми обробки, реалізувати ряд функціональних можливостей, зокрема:

- можливість вимірювання електричних постійних, вологості та швидкості розповсюдження радіоволн в шарах ґрунта;
- можливість адаптації параметрів зондувального сигналу (ширини спектра та положення на осі частот) до типу ґрунту та глибини моніторингу;
- використання комплексної радіофізичної та гідрогеологічної інформації при інтерпретації результатів моніторингу;
- підвищену точність вимірювання меж шарів ґрунта та об'єктів порівняно з класичними (імпульсними) радіолокаторами підповерхностного зондування.

Антенна георадара розроблена з урахуванням вимог подавлення випромінювання сигналу в верхнє напівпространство. Для цього вона виконана в формі прямокутного металічного резонатора з прорезаною в його нижній частині щелею. Діаграма направленості такої антени має ширину, що не перевищує 30 градусів під поверхнею землі.

Приведемо основні технічні характеристики георадара:

- Излучаемая мощность – 3 Вт.
- Диапазон рабочих частот 100...450 МГц.
- Максимальная глубина зондирования – 10...30 м в зависимости от влажности грунта.
- Разрешающая способность в вертикальном направлении – 5...30 см в зависимости от глубины зондирования и влажности грунта.
- Время накопления сигнала – 1,3 с.
- Точность измерения электрических постоянных и скорости распространения радиоволн в грунте – 15...20 %, влажности слоев грунта – 20...30 % в зависимости от глубины зондирования и априорной геологической информации.
- Потребляемая мощность – 20 Вт
- Масса – 11,5 кг.

Преимуществами по сравнению со стандартными методами геоэлектроразведки (метод электрокаротажа, частотного и пространственного профилирования и др.) являются:

- более высокая разрешающая способность по всем трем координатам – глубине и в горизонтальной плоскости;
- значительное ослабление мешающих сигналов, возникающих вследствие воздействий отражений от различных объектов, расположенных на поверхности земли (инженерные коммуникационные сооружения, здания, электропровода и пр.).

При обработке результатов зондирования применялось оригинальное программное обеспечение, разработанное индивидуально для каждой задачи. На первом этапе производилась обработка результатов зондирования с целью построения радиолокационных изображений подповерхностного пространства по каждому из проходов. Причем, для определения литологической структуры грунта, глубины залегания верховодки, зон разуплотнения грунта и исследования фундамента применялись разные математические алгоритмы обработки сигналов. Необходимость

применения различных математических алгоритмов определяется многими факторами, основные из которых:

- большой динамический диапазон мощности сигналов, отраженных от верхних и нижних неоднородных подповерхностных объектов (например границ литологических слоев грунта);
- сильное влияние мощных отражений от неоднородностей, расположенных в верхних слоях грунта, на сигналы, приходящие с больших глубин (эффект мультипликативности);
- зависимость фазовой скорости распространения радиоволн от литологического состава слоя грунта.

Проверка возможностей георадарного зондирования осуществлялась на нескольких участках, в том числе на территории двух бывших военных аэродромов в Сумской области, на территории строительства культурного центра в г. Сумы, а также на участке оползня Генуэзской крепости в г. Судак). На некоторых участках была оборудована сеть контрольно-измерительных скважин для наблюдения за уровнем грунтовых вод и мощностью слоя жидких нефтепродуктов, что позволило выполнить сравнение результатов исследований с фактическими данными.

2. ОСОБЕННОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖЕНИЙ ОТ СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ГРАНИЦ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ УРОВНЕМ ГРУНТОВЫХ ВОД

Для понимания физики процессов при проведении измерений с помощью георадара рассмотрим особенности радиолокационного зондирования зоны аэрации с поверхности земли с целью пространственной локализации границы залегания уровня грунтовых вод. Для решения задачи об отражении радиоволн от таких границ необходимо знать

соответствующие им законы изменения с глубиной электрических характеристик грунта, для расчета которых, в свою очередь, необходимо пользоваться законами изменения влажности по глубине в этой области.

Для расчета зависимости объемной влажности, отсчитываемой от границы со 100 % влажностью (уровень грунтовых вод), воспользуемся методикой [4]. Известно, что в пористой среде из-за капиллярных явлений насыщенность влаги в толще пород зоны аэрации не постоянна. Для расчета законов распределения насыщенности влаги в настоящее время получила широкое распространение эмпирическая зависимость Ван Генухтена, связывающая для двухфазной системы воздух-вода капиллярное давление $h(z)$ и насыщенность S :

$$\frac{S - S_m}{1 - S_m} = \begin{cases} \left[1 + (\alpha h_i(z))^n \right]^{-m} & h_i \geq 0 \\ 1 & h_i \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $S = (S - S_m)/(1 - S_m)$ – "эффективная" насыщенность поровой среды водой; S_m – "остаточная" (неизвлекаемая) насыщенность по воде; $\alpha[L^{-1}]$ и $n[-]$ – параметры поровой среды; $m = 1 - 1/n$; $h_i(z)$ – функциональная зависимость капиллярного давления фазы i ($i = w$ – вода, o – нефтепродукт, a – атмосфера) от глубины z .

Функциональные зависимости капиллярного давления при равновесии связаны с глубиной следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} h_w(z) &= (1 - \rho_{ro})z_{ow} + \rho_{ro}z_{ao} - z, \\ h_o(z) &= \rho_{ro}(z_{ao} - z), \\ h_a &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где ρ_{ro} – плотность нефтепродукта относительно воды; ρ_w – плотность воды; z_{oo} – граница раздела воздух/нефтепродукты; z_{ow} – граница раздела нефтепродукты/вода; z – вертикальная координата точки относительно общей плоскости сравнения.

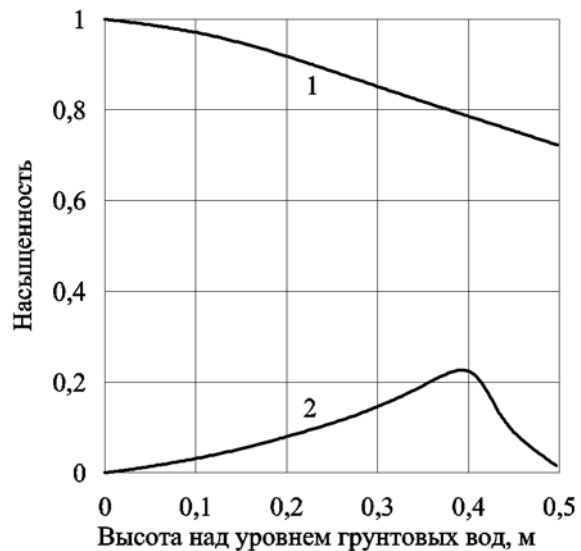


Рис. 1. Распределение насыщенности влаги (кривая 1) и нефтепродукта (кривая 2) по глубине

Применительно к зависимости (1) изучено большое число грунтов, для которых определены параметры α и n .

Для указанных ниже условий проведения экспериментов использовалась модель грунта в виде песчанистого суглинка со следующими параметрами, входящими в формулу Ван Генухтена: $S_m = 0,15$; $\alpha = 7,5$; $n = 1,9$.

На рис. 1 показано изменение насыщенности грунта влагой и нефтепродуктом (при наличии такового) порового пространства при равновесных условиях для условий проведения экспериментов (песчаный суглинок, глубина УГВ 3,5 м). По оси абсцисс отложена высота относительно уровня грунтовых вод.

Глубина залегания УГВ и параметры грунта выбраны применительно к условиям проведения экспериментальных исследований.

Для расчета зависимости электрических характеристик грунта от частоты при различной влажности, солености, пористости и процентном содержании твердых фракций, использовалась модель [5, 6]. Согласно этой

модели элемент грунта в диапазоне частот от нескольких десятков до нескольких сотен мегагерц можно рассматривать как статистически однородную механическую смесь твердых частиц, воздуха, пленочной влаги и порового электролита. Для выражения эффективной комплексной диэлектрической проницаемости смеси через значения проницаемостей и объемные концентрации компонент применялась методика работы [6].

В модели использовалась трехфазная смесь (твердая фракция, влага, воздух) со следующими параметрами: пористость грунта; объемное содержание воздуха; объемная влажность; объемное содержание твердой фазы; комплексная диэлектрическая проницаемость твердой фазы (кварц, полевой шпат), электролита, пленочной влаги и воздуха.

Используя графики зависимости электрических характеристик суглинка от влажности и степени насыщенности нефтепродуктом, построим результирующую зависимость относительной диэлектрической проницаемости от глубины на частоте, соответствующей середине выбранного диапазона частот. Эта зависимость представлена на рис. 2.

Таким образом, после подстановки зависимости влажности от глубины, определяющей влажность в каждом дискретном слое, согласно формуле Ван Генухтена (1), в формулы определяющие электрические характеристики грунта [6], можно рассчитать их функциональные зависимости от частоты для участка с распределенной границей.

Перейдем к расчету коэффициентов отражения радиоволн от рассматриваемых границ. Для этого воспользуемся результатами работы [1], где рассмотрены методы вычисления коэффициентов отражения от неоднородного слоя с произвольным законом изменения электрических характеристик в случае падения на этот слой плоской волны. Такое приближение не учитывает особенности, связанные с отличием формы реальной элек-

тромагнитной волны от плоской, но дает возможность качественно и количественно оценить особенности отражения радиоволн от реальных подповерхностных слоев. В расчетах использовался численный метод решения, основанный на разбиении рассматриваемого слоя на N малых по толщине слоев (по сравнению с длиной волны в рассматриваемом слое), в пределах которых электрические характеристики являются фиксированными. В этом случае коэффициент отражения от неоднородного слоя определяется следующим выражением:

$$R = \frac{Z_s - Z_1}{Z_s + Z_1}, \quad (3)$$

где Z_s – поверхностный импеданс неоднородного слоя; Z_1 – импеданс слоя, из которого падает волна на неоднородный слой.

Вычисление поверхностного импеданса на распределенной границе рассматриваемого неоднородного слоя производится рекур-

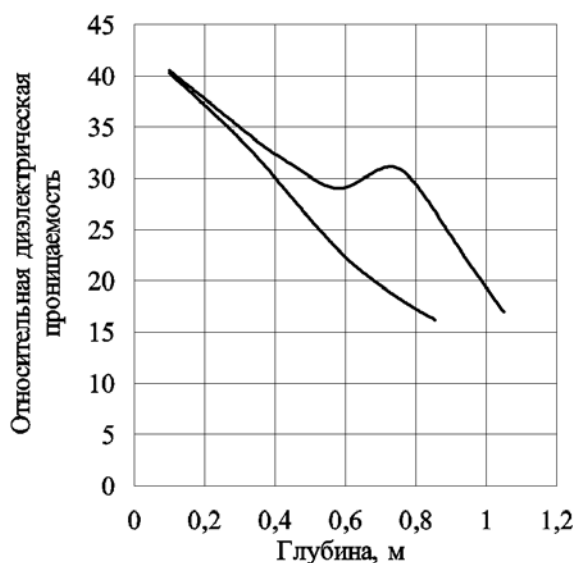


Рис. 2. Результирующая зависимость относительной диэлектрической проницаемости от глубины на частоте, соответствующей середине выбранного диапазона частот: верхняя кривая – при наличии слоя нефтепродукта, нижняя – в отсутствие нефтепродукта

рентно, начиная с последнего от границы n -го элементарного слоя по формулам:

$$Z_S^{n-1} = \frac{Z_S^n - iZ_{n-1} \operatorname{tg}(k_{n-1} d_{n-1} \cos \Theta_{n-1})}{Z_{n-1} - iZ_S^n \operatorname{tg}(k_{n-1} Z_{n-1} \cos \Theta_{n-1})} Z_{n-1}, \quad (4)$$

где Θ_{n-1} – угол падения, под которым происходит распространение волны в $n - 1$ слое (определяется из закона Снелиуса [7]; Z_S^n – поверхностный импеданс n -го слоя; Z_{n-1} – импеданс $n - 1$ слоя; d_{n-1} – толщина $n - 1$ слоя.

В результате расчетов было выяснено, что значения коэффициентов отражения радиоволн от границы уровня грунтовых вод и верхней границы линзы с нефтепродуктом находятся в диапазоне значений 0,3...0,4 и 0,35...0,45 соответственно, что достаточно для выделения таких сигналов. Несколько большее значение коэффициента отражения от верхней границы слоя с нефтепродуктом объясняется существенно большей крутизной изменения насыщенности нефтепродукта в этой области. Заметим, что в данном случае можно считать обе границы скачкообразными. Это допущение приводит к ошибкам в расчетах коэффициентов отражения не превышающим 5...10 %. Данный результат можно объяснить тем, что в рассматриваемом диапазоне длин радиоволн имеет место существенное изменение комплексной диэлектрической проницаемости на отрезках меньших и соизмеримых с длиной радиоволны. Это приводит к рассогласованию слоя с распространяющейся электромагнитной волной.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первая серия экспериментов проводилась на участке вблизи бывшего военного аэродрома (пос. Лебедин, Сумская обл.), где была обнаружена линза с авиационным керосином, расположенная на глубине около 7...8 метров

(на уровне грунтовой воды). Участок оборудован сетью контрольно-измерительных скважин. Всего на выбранном участке было снято 9 профилей с шагом замеров 2 м. Расстояние между профилями составляло 5 м. Подповерхностное зондирование было выполнено примерно в девятистах точках.

Данные о литолигическом составе пород получены на основе сравнения радиолокационных изображений с профилями геологических разрезов, представленных УкрНИИНТИЗ г. Сумы. При интерпретации результатов зондирования учитывалась информация о том, что границы уровня грунтовых вод (УГВ) и нефтепродукта не являются четко выраженными. Например, зона перехода от установившегося максимального уровня влажности в насыщенном слое до установившегося уровня естественной влажности слоя могла достигать 1,2...1,5 м. Аналогичная зона для нефтепродукта немного меньше – 0,5...0,7 м. Поэтому эти границы на радиолокационных изображениях выглядят размытыми. Кроме того, уровни воды и нефтепродукта в контрольно-измерительных скважинах расположены обычно ниже уровней их залегания в грунте. Эта разница может быть значительной. Поэтому данные о мощности нефтепродукта, полученные из радиолокационных данных, как правило, существенно завышены по сравнению с данными замеров в контрольно-измерительных скважинах.

Анализ результатов показал, что структура слоев зоны аэрации на выбранном участке весьма неоднородна. Очень хорошо фиксируется граница супесь–песок, расположенная на глубине около 4...6 м. Уверенно фиксируется граница уровня грунтовых вод, которая на рассматриваемом участке располагается на глубине от 7,2 до 8,7 м. Структура зоны аэрации и литологический состав пород на рассматриваемом участке приведены на рис. 3. Граница уровня авиационного керосина фиксируется сравнительно четко по всему участку.

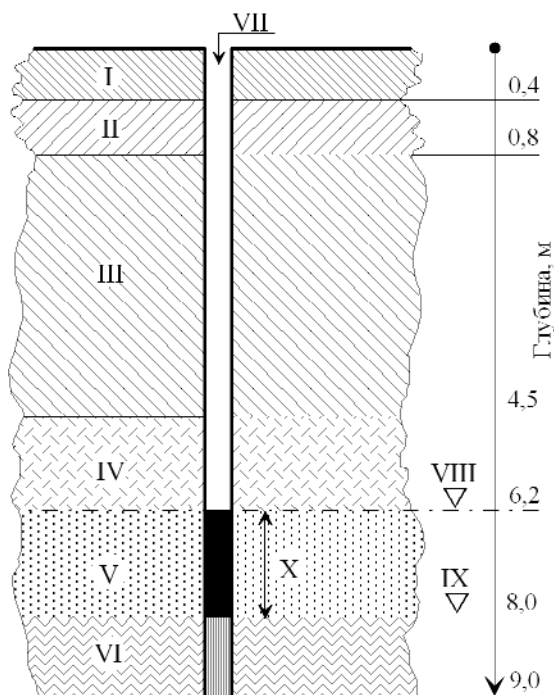


Рис. 3. Структура зони аерації і літологічний склад порід: I – ґрунт чорний суглинок; II – суглинок бурий з примісью рослинних решток; III – суглинок лесовий тугопластичний з запахом ГСМ; IV – пісок дрібний, вологий, водонасичений, забруднений ГСМ; V – шар, насичений нафтопродуктом; VI – водоупорний шар; VII – контрольна скважина; VIII – глибина рівня нафтопродукта; IX – глибина рівня ґрунтових вод; X – потужність нафтопродукта в скважині

На рис. 4 і 5 представлені радіолокаційні зображення, що стосуються відповідно до профілів №1 і 5, відстань між якими становить 20 м. На профілях позначено межі УГВ та верхньої межі нафтопродукта. Видно, що на першому зображенні межі УГВ та нафтопродукта практично злилися, в той час як на другому радіолокаційному зображенні вони чітко розрізні. Той факт, що рівень ґрунтових вод суттєво змінюється (прогинається внаслідок впливу линзи з нафтопродуктом), свідчить про наявність нафтопродукта.

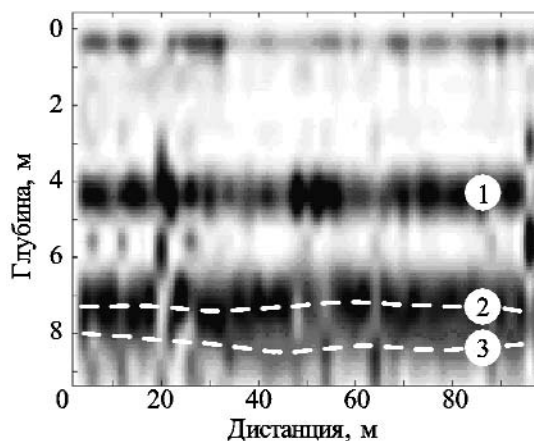


Рис. 4. Радіолокаційне зображення розрізу ґрунту в профілі №1: 1 – межа суглинок/пісок; 2 – верхня межа нафтопродукта; 3 – межа УГВ

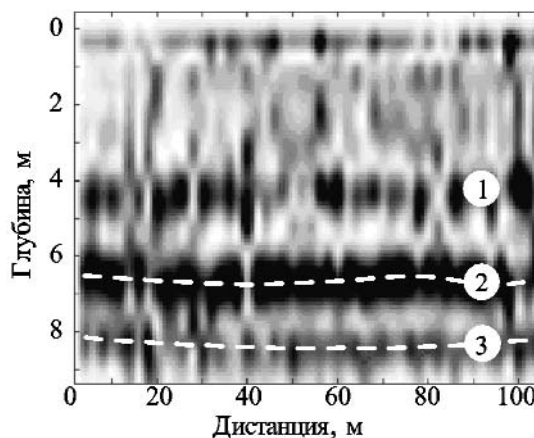


Рис. 5. Радіолокаційне зображення розрізу ґрунту в профілі №5: позначення такі ж, як і на рис. 4

Карти ізоліній потужності нафтопродукта та рівня ґрунтових вод, побудовані за радіолокаційними даними, представлені на рис. 6, а і рис. 6, б відповідно.

Аналіз радіолокаційних зображень і карт ізоліній рівня ґрунтових вод та потужності нафтопродукта дозволив зробити висновок про те, що глибина залягання порід зони аерації, рівня ґрунтових вод та нафтопродукта збігаються з даними, отриманими за допомогою контрольної скважини.

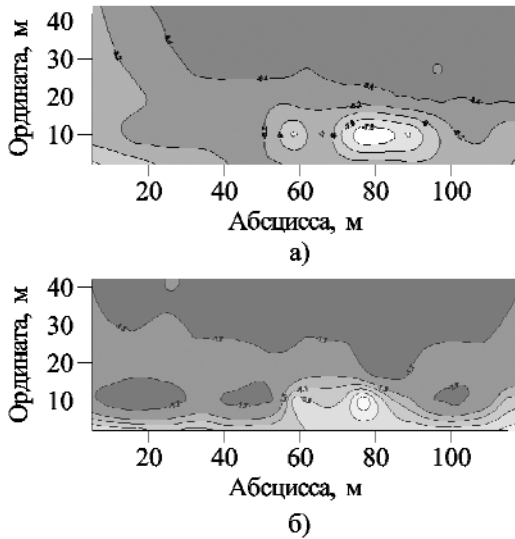


Рис. 6. Карты изолиний мощности нефтепродукта (а) и уровня грунтовых вод (б) на участке измерений

ных скважин. Обнаружено, что на некоторых участках, например, вблизи шоссе, мощность нефтепродукта снижается. Проникновение в эту область происходит в виде "языков", что характерно для неоднородного грунта.

Вторая серия экспериментов проводилась на территории строительства культурного центра в г. Сумы, находящегося в зоне подтопления. Основной задачей было определение уровня грунтовых вод в верхних слоях зоны аэрации, так называемой верховодки, представляющей собой сильно увлажненный слой, расположенный на сравнительно слабо проницаемой границе (водоупорной

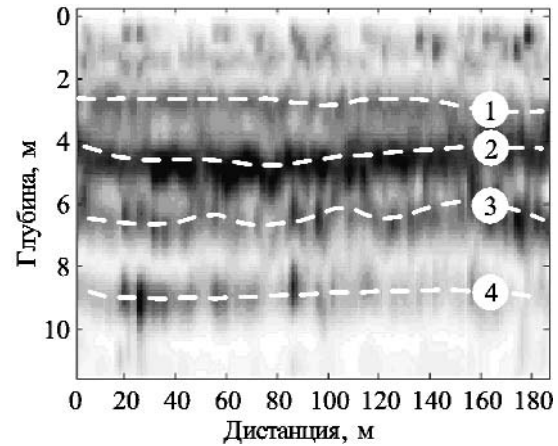


Рис. 7. Радиолокационное изображение сечения грунта по профилю, расположенному в микрорайоне г. Сумы: 1 – Граница супесь/песок; 2 – Уровень грунтовых вод; 3 – Граница песок/суглинки; 4 – Граница водоупорного слоя

границе слоя с малыми значениями коэффициента фильтрации). Источниками верховодки являются осадки и различного рода утечки воды, например, из коммуникационных труб. В табл. 1 приведен литологический состав пород и данные замеров УГВ в контрольно-измерительных скважинах, оборудованных на этом участке. На рис. 7 показано радиолокационное изображение сечения грунта по одному из маршрутов движения георадара на участке.

Сравнение результатов, представленных на рис. 7 и в табл. 1, показывает, что радиолокационные данные хорошо согласуются с

Таблица 1. Глубина расположения границ слоев грунта

Номер слоя	Состав грунта	Глубина, м
1	Почвенно-растительный слой	от 0 до 0,4...0,5
2	Супесь серая, твердая с растительными остатками	до 0,5...0,7
3	Супесь лессовая, серая, твердая с запахом ГСМ	до 3...3,5
5	Песок, желтовато-серый, мелкий и пылеватый с прослоями супеси, маловлажный, с запахом ГСМ	до 6,5...7
6	Уровень грунтовых вод	4...4,5

данными, полученными с помощью контрольно-измерительных скважин.

Третья серия экспериментов проводилась на территории бывшего военного аэродрома в Глуховском районе Сумской области. Под поверхностью этого аэродрома гидрогеологической службой УкрГИИНТИЗ (г. Сумы) при помощи бурения сети контрольно-измерительных скважин была обнаружена и нанесена на карту линза с авиационным керосином. Мощность линзы в области максимума достигала 3,5 м. Примерная карта места проведения измерений с контрольно-измерительными скважинами №7, 8 и 9 приведена на рис. 8, а. На этом же рисунке показаны изолинии уровня грунтовых вод (нижняя граница линзы), построенные по радиолокационным данным. На следующем рис. 8, б приведены изолинии равной мощности линзы, построенные по данным подповерхностного зондирования.

В табл. 2 приведены литологический состав пород, данные замеров УГВ и мощности линзы в контрольно-измерительных скважинах №7, 8 и 9 (уровень грунтовых вод располагался на глубине 13,5...15 м). На радиолокационных изображениях сечений грунта по трассам прохода наблюдались границы слоев грунта разного характера, глубины располо-

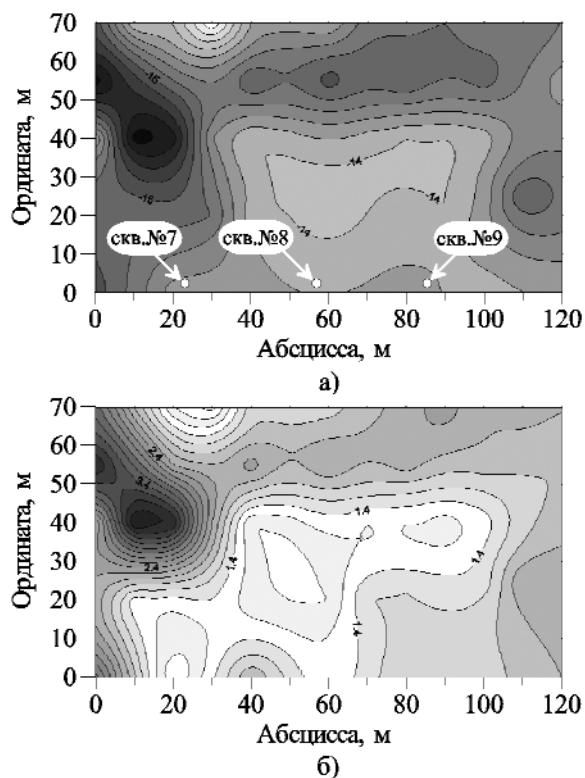


Рис. 8. Карта участка зондирования: а) изолинии нижней границы линзы, построенные по данным бурения; б) изолинии равной мощности линзы по данным георадарного зондирования, наиболее затемненные участки соответствуют мощности 4 м, наиболее светлые – 0,8 м

Таблица 2. Литологический состав пород, данные замеров УГВ и мощности линзы в контрольно-измерительных скважинах

Номер слоя	Состав грунта	Глубина, м
1	Почвенно растительный слой	от 0 до 0,4...0,5
2	Супесь серая, твердая с растительными остатками	до 0,5...0,7
3	Супесь лессовая, серая, твердая с запахом ГСМ	до 6...6,3
4	Супесь бурая, с прослоями песка, щебня, твердая	до 10,2...10,5
5	Песок, желтовато-серый, мелкий и пылеватый с прослоями супеси, маловлажный, с запахом ГСМ	до 11,5...13
6	Супесь бурая, с прослоями песка, пластичная с запахом ГСМ	до 18...19

жения которых практически совпадают с данными, полученными в результате бурения сети контрольно-измерительных скважин.

Ниже на рис. 9 приведено радиолокационное изображение сечения грунта по профилю прохода георадиолокатора через скважины № 7, 8, 9. На этом же рисунке показаны места расположения скважин, через которые проходили трассы проходов георадара, с указанием номера скважины, глубины и мощности авиационного керосина в них. Они показаны в виде заштрихованных полос, расположенных на глубинах, соответствующих данным измерений по этим скважинам. Предполагаемые границы (нижняя и верхняя) линзы показаны пунктирными линиями. Глубина залегания линзы – примерно 12,5...15,5 м. Видно, что глубина расположения и мощность линзы, полученные по радиолокационным данным, хорошо согласуются с данными замеров в скважинах. На изображениях отчетливо видны радиолокационные отражения от границ слоев, указанных в табл. 2. Необходимо отметить, что линза имеет в некоторых местах очень неравномерную мощность (горизонтальные неоднородности). Особенно это относится к участку вблизи скважин №7, 8 и 9.

Четвертая серия экспериментов проводилась на территории Генуэзской крепости в г. Судак. Исследуемая территория примыкала к крепостной стене и занимала площадь 200×120 м². Крупномасштабные уклоны поверхности на различных участках составляли от 3 до 15 градусов. Территория склона крепости подвержена стандартному механизму оползнеобразования, при котором породы, слагающие часть склона, находятся в состоянии предельного равновесия, а смещения происходят по поверхности, которую можно аппроксимировать круглоцилиндрической поверхностью.

В результате радиолокационного подповерхностного зондирования была определена

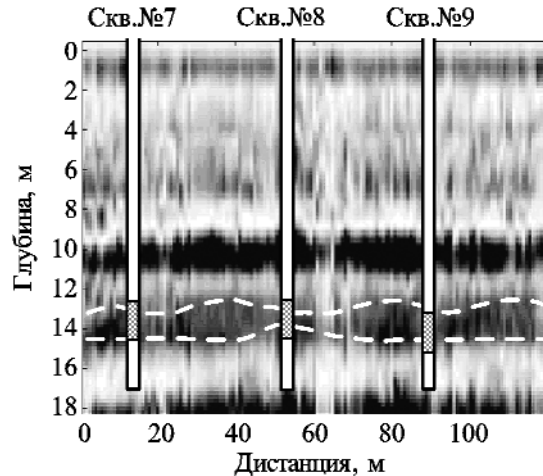


Рис. 9. Радиолокационное изображения сечения грунта по профилю прохода георадиолокатора через скважины 7, 8 и 9

пространственная конфигурация и мощность оползня, пространственная конфигурация литологических слоев грунта, пустоты и разуплотнения грунта.

Анализ радиолокационных изображений сечений грунта показал существование по крайней мере двух границ скольжения пород, слагающих оползень. Первая затрагивает породы расположенные на глубинах 11...12 м, она отчетливо выделяется на всех радиолокационных изображениях сечений грунта на участке зондирования. Вторая граница расположена на глубинах 7...9 м и обнаруживается реже.

Анализ радиолокационных изображений показал, что наиболее интенсивно оползневые процессы проходят на участках с наибольшими уклонами. По линии скольжения на этих изображениях наблюдаются характерные складки пород, вызванные сдвиговым механизмом, приводящим к напознанию верхних пород на нижние. Сказанное иллюстрирует рис. 10, на котором приведено радиолокационное изображение сечения грунта на участке с уклоном около 15 градусов в направлении максимального уклона. Глубина

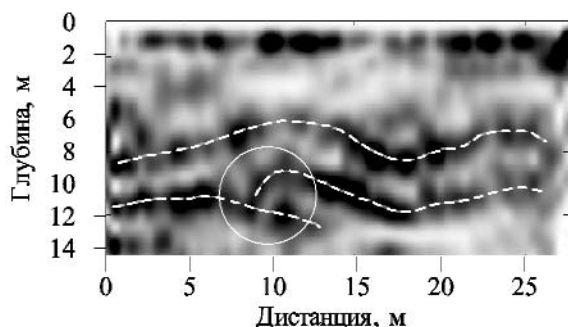


Рис. 10. Радиолокаційне зображення сечення ґрунта в області максимального уклону: окружністю виділена область складок в результаті наповнення шарів оползля

на даному рисунку вказана відносно поверхності землі. На зображенні добре видно сліди оползневих процесів у вигляді характерних складок як результат смяття порід, які розташовані на глибинах від 7 до 9 м і від 10 до 12 м (границі двох шарів).

ВЫВОДЫ

Таким образом, основными выводами, полученными в результате цикла экспериментальных полевых зондирований, проведенных с использованием разработанного георадара, являются:

1. Метод, основанный на георадарном зондировании, может эффективно дополнять существующие методы геологических изысканий и геофизических исследований, давая возможность детально исследовать подповерхностную структуру грунтов, существенно уменьшая расходы на бурение контрольно-измерительных скважин. При этом разрешающая способность по пространственным координатам, получаемая в данном методе, существенно превосходит существующие геофизические методы изысканий, что позволяет выявить тонкую структуру загрязнений.

2. Экспериментально подтвержден вывод о том, что приборы такого класса могут эффективно использоваться при мониторин-

ге и картографировании уровня грунтовых вод в зонах подтопления, участков подповерхностного загрязнения нефтепродуктами (линз), а также для картирования структуры пород в зоне действия оползневых процессов с определением линии скольжения и мощности оползней.

3. Показана возможность уверенного выделения сигналов, отраженных слабоконтрастными слоями (уровень грунтовых вод, границы литологического строения зоны аэрации, верхняя граница слоя нефтепродукта и др.) и достаточно точного для практических приложений определения их глубины залегания.

4. Экспериментально показано, что увеличение мощности линзы сопровождается снижением (прогибом) уровня грунтовых вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьмин В. В., Сугак В. Г. К возможности радиофизического мониторинга верхней подповерхностной структуры Земли // Радиофизика и радиоастрономия. – Харьков, 1997. – 2, №3. – С. 274–280.
2. Сугак В. Г. Оценка возможности обнаружения подповерхностных слоистых неоднородностей при зондировании с поверхности Земли // Изв. вузов. Радиофизика. – 1997. – 40, №8. – С. 952–979.
3. Сугак В. Г. Восстановление электрических характеристик грунта по зависимости коэффициента затухания радиоволн от частоты // Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр./НАН Украины. – Харьков, 2002. – 7, № 3. – С. 491–497.
4. Van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. 44: 892–898.
5. Dobson M. C., Ulaby F. T., Hallikainen M. T., El-Rayes M. A. Microwave dielectric behavior of wet soil – Part 2. Dielectric mixing models // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1986. – GE-23, №1. – P. 35–46.
6. Овчинкин О. А., Сугак В. Г. Влияние электрических свойств грунта на характеристики сигнала при подповерхностном зондировании. Радиофизика и электроника: Сб. научн. тр./НАН Украины. – Харьков, 2001. – 6, № 2-3. – С. 235–241.
7. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 502 с.