УДК 53.082.74, 550.370, 550.372, 550.379

К ВОПРОСУ О ТРЕБОВАНИЯХ К ТЕХНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ГЕОРАДАРА ПРИ ПОИСКЕ ПОЛОСТЕЙ МЕТОДОМ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ Л.Б. Волкомирская, О.А. Гулевич, В.В. Варенков, В.И. Сахтеров

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, 108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4, Россия

На основе численного моделирования задачи георадиолокации рассматриваются требования к техническим характеристикам георадара для обнаружения полостей в подповерхностной среде. Использованный алгоритм решения прямой задачи георадиолокации приближен к реальному эксперименту за счет учета конструкции георадара, параметров источника и приемника, их положения относительно среды исследования и находящейся в ней неоднородности. Приведены расчеты пространственно-временного распределения поля регистрируемого сигнала от импульсного источника, лежащего на поверхности раздела сред с пустотной аномалией заданной геометрии, и на их основе произведена оценка динамического диапазона георадара, необходимого для ее определения. Приведены результаты георадарных исследований малоконтрастных неоднородностей в виде полостей в шахтах с использованием георадарных комплексов серии ГРОТ 12 и их анализ на основе данных численного моделирования. Показано, что уже на фазе планирования эксперимента можно оценить требуемые параметры георадара, с помощью которых можно обнаружить и локализовать интересующие неоднородности на определенной глубине зондирования.

Георадар, поиск пустот, поиск полостей, технические характеристики георадара, георадиолокация, динамический диапазон.

REQUIREMENTS FOR THE PERFORMANCE OF A GROUND-PENETRATING RADAR SYSTEM IN SEARCHING FOR CAVITIES

L.B. Volkomirskaya, O.A. Gulevich, V.V. Varenkov, and V.I. Sakhterov

The requirements for the performance of a ground-penetrating radar (GPR) system for detecting subsurface cavities are analyzed by numerical modeling of the GPR problem. The algorithm used to solve the forward GPR problem is approximated to a real experiment with regard to the design of the GPR system, the parameters of the source and receiver, and their position relative to the medium under study and its inhomogeneity. We calculated the spatiotemporal distribution of the field of the detected signal from a pulse source located at the interface between the medium and a cavity anomaly of a given geometry. The results were used to estimate the dynamic range of the GPR system necessary for determining the anomaly. We also performed GPR surveys of low-contrast inhomogeneities (cavities in mines) using GROT 12 GPR systems and analyzed the survey results by numerical modeling. It is shown that the GPR performance required to detect and locate inhomogeneities of interest at a certain sounding depth can be estimated in the experiment design phase.

Ground-penetrating radar, cavity mapping, search for cavities, GPR performance, GPR survey, dynamic range

введение

Настоящая работа посвящена изучению возможности определения пустот и полостей с заполнением методом георадиолокации и установлению необходимых требований к техническим характеристикам георадаров для решения этой задачи. С этой целью решается прямая задача георадиолокации для модели среды с полостью для получения количественных оценок воздействия неоднородных включений в виде полостей с разным контрастом электрофизических параметров относительно вмещающей породы на поле, измеренное на поверхности.

Задача определения полостей в геологической среде неразрушающими методами весьма актуальна как при исследованиях с земной поверхности, например, при локализации карстов, так и в шахтах, где накопление трещин и иных полостей способствует ухудшению геомеханического состояния массива горных пород, что провоцирует разрушение пройденных и необходимых для дальнейшей работы выработок, повышает риск самовозгорания руды с возможным возникновением эндогенных пожаров в шахте.

© Л.Б. Волкомирская[⊠], О.А. Гулевич, В.В. Варенков, В.И. Сахтеров, 2018

⊠e-mail: mila@izmiran.ru

Интерпретация данных георадарного зондирования подповерхностных областей Земли означает восстановление профиля диэлектрической проницаемости среды по измерениям профиля электромагнитного поля отраженных сигналов, регистрируемых на поверхности. Основные методы решения этой проблемы были изложены в [Гринев, Гигало, 2005]. При исследовании пустот предполагается определение аномалий с электрофизическими параметрами, соответствующими воздуху, во вмещающей горной породе. Пустотные аномалии определяются за счет контраста в параметрах действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости аномалии относительно вмещающей породы. Для успешного практического эксперимента важно определить необходимые параметры георадара и подобрать наиболее эффективную методику последующей обработки георадарных данных. Часто при интерпретации возникает риск ошибочно принять за пустоту любой объект с близким к пустоте контрастом диэлектрической проницаемости.

ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ

Вопрос о возможности выделения пустот методом георадиолокации был затронут в работах [Анур и др., 1999; Владов, Старовойтов, 2005]. В статье [Старовойтов и др., 2013] подчеркнута необходимость более детального изучения данной проблемы наличием практических задач, возникающих при обследовании разнообразных сооружений, и рассмотрены некоторые результаты натурных исследований, выполненных с использованием георадаров «Зонд 12е» и «Око» с антеннами 1000 и 1700 МГц производства компании Radar Systems (г. Рига, Латвия) и ООО «Логис» (г. Раменское, Московская область). Полученные данные обрабатывались с помощью систем RadExPro Plus и RadExPlorer (ООО «Деко-геофизика», г. Москва) и GeoScan32 (НПЦ «Геотех», г. Москва). Некоторые аспекты перечисленных выше проблем были рассмотрены в работе [Данильев, 2011], однако, как показано в [Старовойтов и др., 2013], недостаточно полно проанализированы возможности георадиолокации при обнаружении пустот, особенно небольшой мощности. Также к недостаточно проработанным вопросам относится анализ данных, полученных с использованием низкочастотных и высокочастотных антенн для полостей различной мощности и с разным заполнением. Сделанный в работе [Данильев, 2011] вывод о том, что при сравнительно малых глубинах формирования деструкций необходимо применять антенны с частотами 1.5 и 2.0 ГГц, которые обеспечивают исследования с разрешающей способностью до нескольких сантиметров, является не совсем корректным, так как возможность обнаружения полостей небольшой мощности конкретным комплектом аппаратуры определяет, прежде всего, их контрастность, т. е. тип заполнителя (воздух или вода), а не инструментальная разрешающая способность по вертикали.

В работе [Старовойтов, 2008] показано, что, даже несмотря на высокую разрешающую способность высокочастотных антенн по вертикали, пустоты небольшой мощности практически не выделяются. Отмечается, что зачастую заверить результаты интерпретации натурных исследований практически невозможно (особенно в городских условиях), поэтому для лучшего понимания возможностей георадиолокационного метода при решении указанных в [Старовойтов и др., 2013] задач было проведено математическое моделирование, основанное на получении синтетических георадарограмм при задании плоскослоистой модели среды, с представлением поля источника в приближении геометрической оптики. При этом полость представлялась в виде плоского слоя разной мощности с электрофизическими параметрами, соответствующими воздуху и воде. Таким образом, в данном случае можно говорить о качественном методе моделирования, оперирующим главным образом со временем запаздывания отраженных импульсов.

В то же время для понимания влияния конструктивных особенностей георадара в математическом моделировании прямой задачи необходимо использовать всю информацию о параметрах георадара. Так, разрешающая способность по вертикали оценивается только с позиции частотного диапазона антенн. При этом не уделяется внимание форме зондирующего импульса и динамическому диапазону приемника.

В настоящей работе впервые эти вопросы рассмотрены на основе численного моделирования прямой задачи георадиолокации, учитывающей то, что антенны расположены на поверхности разрыва, т. е. приближение плоской волны неприменимо, передатчик излучает сверхширокополосный импульс, а величина контраста в диэлектрической проницаемости между вмещающей породой и неоднородностью имеет значение, при котором использовать борновское приближение для вычисления поля, порождаемого неоднородностью, нельзя.

Как известно, численное моделирование отраженных сверхширокополосных импульсных сигналов представляет собой весьма сложную задачу, часто невыполнимую из-за недостатка исходных данных [Марчук и др., 2005]. Решение этой задачи даже в упрощенной формулировке позволяет глубже понять основные закономерности механизма формирования отраженного сигнала и выделить наиболее существенные элементы в конструкции приборов, влияющие на их формирование и, следовательно, на адекватную интерпретацию получаемых данных в натурных экспериментах. Во многих георадарах, в частности в приборах серии ГРОТ, приемная и передающая антенны представляют собой проводники, которые во время измерений располагаются на поверхности. Выражения для электрического поля в плоскости разрыва на любом расстоянии от антенны были получены еще А. Зоммерфельдом [Sommerfeld, 1909, 1926], однако прямой расчет поля на поверхности весьма обременительная задача. Следует учитывать, что измерения поля при георадиолокации проводятся, как правило, на небольших расстояния от излучающей антенны, что не позволяет использовать известные представления поля в дальней зоне [Бреховских, 1957].

Впервые алгоритм решения прямой 2D задачи георадиолокации, в которой поле излучателя формируется антеннами, лежащими на границе раздела сред земля—воздух, а неоднородности в земле имеют различную конфигурацию, был рассмотрен в [Volkomirskaya et al., 2013]. Использованный в настоящей работе алгоритм и программа RADAR 2D [Volkomirskaya et al., 2013] максимально приближены к технологии георадиолокационных измерений как с поверхности земли, так и в шахтах, в которых по наблюдению регистрируемого радиоимпульса на поверхности или на стенке шахты определяют распределение диэлектрической проницаемости. Прямое сопоставление рассчитанного электромагнитного поля на поверхности, которое включает в себя как поле поверхностной волны, образованное системой генератор—передающая антенна, лежащей на границе раздела сред с заданными электрическими параметрами, так и возмущение электромагнитного поля от неоднородности с заданными электрофизическими и геометрическими параметрами, позволяет сделать количественные оценки вклада поля возмущения в полное поле, регистрируемое на поверхности. В свою очередь, с помощью этих оценок можно определить минимальные требования к георадару, необходимые для локализации неоднородности в зависимости от ее положения, геометрии и степени различия в электрофизических параметрах со вмещающей средой.

Рассмотрим, как различные характеристики георадара, в том числе динамический диапазон, определяют его практические возможности по регистрации подповерхностных полостей.

Динамический диапазон георадара D определим как 20 lg (S_{max}/S_{min}), где S_{max} и S_{min} — максимальное и минимальное значения сигнала, который может быть преобразован в цифровую форму без искажения и потери информации [Волович, 2005].

При этом обращаем внимание на то, что, как правило, динамический диапазон георадара связывают с глубиной исследования, так как при распространении сигнала в результате затухания амплитуда сигнала становится соизмерима с шумами аппаратуры. В то же время даже на небольшой глубине возникают проблемы с распознаванием малоконтрастных неоднородностей, т. е. неоднородностей с малым отличием электрофизических параметров от вмещающей среды, а также аномалий малой протяженности (как, например, заполненных газом полостей в сухих грунтах). В этом случае динамический диапазон принимаемого сигнала должен соответствовать динамическому диапазону аналого-цифрового преобразования (АЦП), т. е. число разрядов в АЦП должно позволить определить различие в диэлектрической проницаемости и проводимости между породой полости и вмещающей средой. В процессе работы АЦП происходит не только квантование сигнала по уровню амплитуды сигнала, но и его дискретизация во времени. Сигнал, непрерывно изменяющийся во времени, заменяют рядом отсчетов этого сигнала. Ясно, что если отсчеты отстоят друг от друга на слишком большие интервалы, то при дискретизации может произойти потеря информации: важные изменения сигнала могут быть пропущены преобразователем, если они произойдут не в те моменты, когда были взяты отсчеты. Естественным пределом служит быстродействие преобразователя. Известно, что в геофизической аппаратуре, работающей в наносекундном диапазоне, такой элементной базы долгое время не было и основная часть приемных устройств использовала стробирование для переноса процесса оцифровки в низкочастотную область. В этом случае из-за нелинейных искажений теряется информация о низкочастотной части отраженного сигнала. В настоящей работе мы попытаемся, в частности, определить насколько критичными являются преобразования в тракте АЦП для выделения пустотных аномалий.

СХЕМА РЕШЕНИЯ ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПУСТОТЫ В ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

Для решения задачи рассматривается модель двухслойной среды с заданной геометрией неоднородности. Ограничимся здесь двумерной геометрией: ось *x* направлена перпендикулярно поверхности. Антенна возбуждает ток с плотностью $\mathbf{J} = \{0, 0, J(t, x, y)\}$, направленный вдоль оси *z*; его величина и материальные параметры среды не зависят от *z*. В этой геометрии зондирования напряженность и индукция заданы как $\mathbf{E} = \{0, 0, E(t, x, y)\}$ и $\mathbf{D} = \{0, 0, D(t, x, y)\}$, напряженность магнитного поля $\mathbf{H} = \{H_x(t, x, y), H_y(t, x, y), 0\}$ (среду считаем немагнитной). Связи этих векторов заданы уравнениями Максвелла:

$$c\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\partial H_y}{\partial t}, \quad c\frac{\partial E}{\partial y} = -\frac{\partial H_x}{\partial t},$$

$$c\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) = \frac{\partial D}{\partial t} + 4\pi J,$$

$$D(t) = E(t) + \int_0^\infty f(\tilde{t})E(t-\tilde{t})d\tilde{t}.$$
(1)

В задаче импульсного зондирования все функции в системе линейных уравнений (1) равны нулю при $t \le 0$ и ограничены при всех t. В этом случае естественно использовать преобразование Лапласа. Сохраняем за изображениями Лапласа те же обозначения, что и для оригиналов: $E(t, x, y) \Rightarrow E(p, x, y)$, $H_x(t, x, y) \Rightarrow H_x(p, x, y)$ и т. д., тогда применение преобразования Лапласа к системе (1) дает:

$$c\frac{\partial E}{\partial x} = pH_y, \ c\frac{\partial E}{\partial y} = -pH_x, \ c\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) = p\varepsilon E + 4\pi J, \tag{2}$$

где $\varepsilon(p, x, y) = 1 + f(p, x, y)$ — диэлектрическая проницаемость среды. Из уравнений (2) следует волновое уравнение

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \equiv \nabla^2 E = \frac{p^2}{c^2} \varepsilon E + \frac{4\pi p}{c^2} J, \qquad (3)$$

функция Грина $G(p, x, x_0, y, y_0)$ которого удовлетворяет уравнению

$$\nabla^2 G - (p/c)^2 \varepsilon G = \delta(x - x_0, y - y_0), \quad k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda, \quad p \to -i\omega$$
(4)

и условию излучения на бесконечности.

Двухслойная среда определяется комплексной диэлектрической проницаемостью вида

$$\tilde{\varepsilon}(x) = \begin{cases} \varepsilon_a, \ x < 0\\ \varepsilon_b, \ x > 0 \end{cases}.$$
(5)

Считаем, что свойства среды без дисперсии задает комплексная проницаемость (5).

В разработанной для численного моделирования программе Radar 2D [Volkomirskaya et al., 2013] решение уравнения (4) реализуется с помощью минимизации функции, в качестве аргументов которой используются значения поля $E(k_0, x, y)$ на прямоугольной сетке.

В программе рассматривается двухслойная среда с вкраплениями (неоднородностями). Верхний слой — воздух (в математической модели это вакуум) с диэлектрической проницаемостью, равной единице. Нижний слой — среда с комплексной диэлектрической проницаемостью ε_b , действительная и мнимая часть которой обозначаются ε_{b_r} и ε_{b_i} . Электромагнитное поле возмущения, полное поле и ток в антенне считаются двухмерными. Диэлектрическая проницаемость неоднородности ε состоит из действительной и мнимой части $\varepsilon_{b_r} + \delta \varepsilon_{0_r}$ и $\varepsilon_{b_i} + \delta \varepsilon_{0_r}$. Здесь $\delta \varepsilon_{0_r}$ и $\delta \varepsilon_{0_i}$ — разница в действительной и мнимой части и излектрической проницаемости неоднородности неоднородности неоднородности неоднородности неоднородности неоднородно-

части диэлектрической проницаемости неоднородности и вмещающей породы.

Рассмотрим модель среды для численного эксперимента. На основе упрощенной модели, которая тем не менее учитывает существенные особенности реальной задачи, рассмотрим возможности выявления количественного влияния аномалии на измеряемое георадаром поле на поверхности, а также варианты приемов обработки сигнала для лучшего выделения аномалий и их характеристик.



Рис. 1. Модель изучаемой среды.

Ближайшая к поверхности точка неоднородности имеет координаты x_0, y_0 . Система координат в простейшем случае при одиночном объекте изображена на рис. 1.

На рис. 1 представлена модель среды, состоящая из двух слоев с электромагнитными параметрами ε_a и ε_b . Излучатель, а также точки наблюдения сигнала расположены на поверхности грунта. Программа Radar 2D выполняет расчет полного поля излучения, которое представляет собой сумму полей от излучателя, находящегося на границе двух сред, и поля, порождаемого возмущением от неоднородности в виде прямоугольника с разным углом наклона, шириной и длиной (обозначены черным цветом). Такое задание неоднородности является упрощенным, но тем не менее часто встречается как в описаниях карстовых полостей, так и пустотных аномалий в горных выработках, например, в рудных месторождениях.

Решение задачи представляется в виде зависимостей поля, порождаемого импульсом тока в излучателе, от времени. Зависимость исходного тока от времени задается в произвольной форме. В данной версии программы она описывается формулой

$$J(t) = J_0 \begin{cases} \exp(-\theta t)\sin(\omega t) & t < \tau \\ 0 & t \ge \tau \end{cases}.$$
 (6)

Здесь $\omega_0 = 2\pi/\tau$, $\theta = C_0/\tau$; τ — длительность импульса, C_{θ} — отношение максимального и минимального значения амплитуды импульса тока. Параметр J_0 играет в дальнейших расчетах роль нормировочного для величин J (соответствующую нормировку вводим и для E).

Данное представление поля позволяет при планировании эксперимента оценить влияние таких характеристик прибора, как частота дискретизации при оцифровке в приемном устройстве, длительность импульса излучателя (передающего устройства) и его форму, разрядность АЦП в приемном устройстве на возможность обнаружения интересующих объектов с заранее заданными параметрами.

В результате расчетов получаем значения полного поля и поля возмущения. В реальных экспериментах мы имеем дело только с измеренным полным полем на поверхности. Модельный расчет полного поля и отдельно поля возмущения позволяет оценить вклад поля возмущения в полное поле от разных неоднородностей при разных соотношениях электрофизических параметров неоднородностей и среды, в которой они находятся, и оценить необходимые характеристики георадара, позволяющие распознать ту или иную неоднородность по измеренному полному полю.

Для масштабирования используются значения разницы максимума и минимума нормированных амплитуд полного поля δE и поля возмущения δE_{v} . Сравнивая эти величины, можно оценить необходимую точность оцифровки поля в приемном устройстве георадара.

Интерфейс программы позволяет изменять интервал оцифровки, полное время наблюдения, число точек сетки по координатам x и y, точность вычисления целевой функции, шаг перемещения приемника, а также число положений излучателя, число неоднородностей, изменение ее диэлектрической проницаемости относительно окружающей среды, координаты, угол α и размер.

Таким образом, программа позволяет моделировать практически любое распределение неоднородностей и оценить возможность обнаружения и точность локализации заданных объектов.

При планировании эксперимента можно оценить влияние таких технических характеристик прибора, как частота дискретизации при оцифровке в приемном устройстве, длительность импульса излучателя (передающего устройства) и его форму, разрядность АЦП в приемном устройстве на возможность обнаружения интересующих объектов с заранее заданными параметрами.

Для сравнения с реальным экспериментом наибольший интерес представляет расчет поля на поверхности, где располагается приемная антенна.

Программа дает возможность:

1. Вычислять поле при произвольном положении излучателя и приемника. Данная опция позволяет воспроизводить технологию георадарной съемки как в режиме профилирования, когда и передатчик, и приемник перемещаются по профилю с определенным расстоянием между ними, так и в режиме зондирования (годографа), когда передатчик не перемещается, а приемник сдвигается с определенным шагом.

2. Вычислять поле возмущения от неоднородности с произвольно заданными координатами, углами наклона линейными размерами и диэлектрическими проницаемостями.

3. Формировать файлы с зависимостями полного поля и поля возмущения от частоты и времени во всех точках на поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера рассчитаем поле на поверхности при моделировании изображенного на рис. 1 объекта. Результаты расчета полного поля *E* и поля возмущения *E_v* в точке наблюдения с использованием описанного алгоритма для указанной модели представлены на рис. 2 и 3. На графиках рассчитанных зависимостей времена прихода импульсного фронта отмечены вертикальной линией; численные значе-



Рис. 2. Зависимость полного поля (*a*) и поля возмущения (δ) от времени в точке *y* = 0.22 при положении антенны передатчика *y*₀ = 0.1.

Шаг по времени 0.1333 нс. $a - \delta E = 208.7, \delta - \delta E_y = 3.3$. Тонкая вертикальная линия — время прихода импульсного фронта.

ния этих времен можно использовать для оценки влияния погрешности, обусловленной дискретной аппроксимацией спектров, на результаты вычислений. Пространственные координаты так же, как токи и поля, во всех этих зависимостях (кроме натурных данных) нормированны; нормировка их непосредственно связана с шагом сетки численного счета. На рис. 2 представлены графики зависимости полного поля и поля возмущения от неоднородности в виде прямоугольника, расположенного под углом 45° толщиной 0.02 усл. ед. и длиной 0.20 усл. ед. в породе с $\varepsilon_r = 5$ при разных положениях приемной антенны. Положение неоднородности определяется верхней точкой с координатами $x_0 = 0.05$, $y_0 = 0.30$. Таким образом, размер полости в 2.5 раза меньше минимальной глубины залегания. Мы намеренно указываем здесь размеры модели в условных единицах, которые могут соответствовать метрам, десяткам метров и т. д. при подборе пространственно-временного масштаба для целей конкретного эксперимента.

Очевидно, что для обнаружения неоднородного включения параметры приемника должны позволить определить разницу между максимальным и минимальным значением амплитуд поля возмущения δE_{ν} на фоне изменения полного поля δE . Минимальное значение сигнала не может быть меньше величины, соответствующей нижнему уровню квантования при оцифровке, а максимальное — не должно превышать величины, соответствующей N квантам [Волович, 2005]. Для нормированного сигнала относительная величина максимальной погрешности квантования равна 1/N, где N — число уровней квантования. Этой же величиной, представленной в логарифмических единицах (дБ), оценивается уровень шумов квантования АЦП. Уровень шумов квантования определяется по формуле: $D = 20 \lg (1/N)$. Для восьмиразрядного АЦП N = 256, D = -48 дБ; для шестнадцатиразрядного N = 65536, D = -96 дБ. Эти цифры наглядно демонстрируют, что с ростом разрядности АЦП шум квантования уменьшается.

При этом сама оцифровка не должна вносить нелинейных искажений, т. е. оцифровка сигнала должна проводиться без частотного и временного стробирования во избежание дополнительных ошибок.

Диапазон изменения амплитуд полного поля и поля возмущения позволяет определить необходимый динамический диапазон прибора (количество разрядов АЦП) для локализации неоднородностей. Так, в описанном случае, когда разница между неоднородным включением и вмещающей средой $\delta \varepsilon = 4$ составила $\delta E = 208.7$ и $\delta E_v = 3.3$, в отсутствие иных помех, идеальному георадару достаточно семиразрядного АЦП для локализации неоднородности в виде пустоты. Расчеты показывают, что при уменьшении величины $\delta \varepsilon$ до 1 значения δE_v при прочих равных условиях снижаются на порядок.

Таким образом, при уменьшении диэлектрической проницаемости среды для локализации полости необходимо увеличивать разрядность АЦП. Аналогично необходимо увеличивать разрядность АЦП при увеличении глубины положения неоднородности, так как регистрируемая на поверхности напряженность поля возмущения будет уменьшаться вследствие затухания сигнала.

Рассмотрим результаты численных экспериментов в привычном для георадиолокации виде, т. е. визуализации данных измерения полей на поверхности с использованием трехкоординатных (положение приемника—глубина—временная задержка) представлений — радарограмм. Как известно, при выбранном усредненном значении диэлектрической проницаемости геологической среды время задержки пропорционально глубине.

Размах амплитуды полного поля здесь определяет верхнюю границу диапазона амплитуд, а размах амплитуды поля возмущения задает нижнюю границу амплитуд, которые определяют порог чувствительности приемника георадара для задачи выделения поля возмущения на фоне полного поля.



Рис. 3. Радарограммы при перемещении георадара по профилю с вкраплением неоднородности в виде наклонной плоскости малой толщины при разных электрофизических параметрах вкрапления.

Модель вкрапления: $x_0 = 0.05$, $y_0 = 0.30$, угол наклона плоскости $\alpha = 45^\circ$, толщина 0.02, длина 0.60, $\delta \varepsilon_{0_r} = 4(a)$, $\delta \varepsilon_{0_r} = 1(b)$, $\delta \varepsilon_{0_i} = 0.1$. *I* — поле после обработки, *2* — полное поле, *3* — поле возмущения. В min-max представлении радарограмм визуализируются линии минимальных и максимальных значений рассчитанных полей как функции поверхностной координаты приемника и глубины.

Расчетные радарограммы с выделенными максимумами и минимумами отраженного сигнала для полного поля, поля возмущения и отфильтрованного полного поля представлены на рис. 3. По вертикальной оси справа отложено время задержки, слева — глубина при выбранном усредненном значении показателя диэлектрической проницаемости. Вверху, по оси *y*, отложено положение георадара при профилировании. Геометрия вкрапления одинакова на рис. 3, *a* и 3, *б*, отличие заключается в электрофизических параметрах включения.

На рис. 3, *а* разница в реальной части коэффициента диэлектрической проницаемости неоднородного включения с вмещающей средой составляет 4, а на рис. 3, δ это 1. Видно, что на радарограмме полного поля (см. рис. 3, δ , усл. 2) нет проявлений поля возмущения от неоднородности. И, как следовало ожидать, с увеличением контраста в электрофизических параметрах неоднородности (см. рис. 3, *a*, усл. 2) становится заметнее проявление ее в значениях полного поля на поверхности.

При проведении реального эксперимента регистрируется только полное поле на поверхности. Визуально, без проведения дополнительной математической обработки, по первичной рассчитанной радарограмме полного поля (см. рис. 3, δ , усл. 2) бывает трудно выделить поле возмущения (см. рис. 3, δ , усл. 3), если контраст между параметрами неоднородности и вмещающей породой мал. В реальном эксперименте эта задача еще больше усложняется из-за присутствующих дополнительных помех.

На рис. 3, *a*, *б*, усл. *1* представлено полное поле после обработки с помощью фильтрации в программе GROT [Volkomirskaya et al., 2013].

Программа GROT позволяет проводить обработку георадарных данных с учетом влияния поля поверхностной волны. Описанный в работе [Volkomirskaya et al., 2013] алгоритм позволяет выделять слабые сигналы, отраженные от подповерхностных объектов на фоне поверхностной волны. Обработка



Рис. 5. Радарограммы полного поля, рассчитанные для расстояния между антеннами 0.2 (I) и 0.1 (II) и пустой полости толщиной 0.4 при одинаковых формах зондирующего импульса.

Справа колонка градации амплитуд в оттенках серого.

данных георадиолокации, основанная на вычитании из полного поля на поверхности низкочастотной огибающей поверхностной волны, эффективна при условии, когда неоднородность находится



вблизи передатчика и поле поверхностной волны маскирует поле возмущения. В реальных экспериментах такая ситуация возникает часто, так как для увеличения глубины исследования увеличивают длину антенн и длительность импульса. Однако такая обработка георадарных данных возможна только при условии, что полное поле регистрируется на всем интервале временных задержек за один импульс без стробирования и при линейности характеристик всех узлов приемника георадара. Только при такой оцифровке фиксируется низкочастотная составляющая поля полного поля без искажений при заданном динамическом диапазоне приемника.

Современное состояние элементной базы позволяет увеличивать количество разрядов АЦП и скорость оцифровки в целях увеличения разрешающей способности при георадарных исследованиях. Последние модификации георадаров серии ГРОТ 12 [Волкомирская и др., 2012] позволяют проводить оцифровку за один импульс передатчика через 1нс и разрядностью АЦП = 12 при линейности АЦП и дополнительных аттенюаторов в диапазоне от 1 до 2000 МГц.

Рассмотрим влияние формы зондирующего импульса на разрешающую способность и, следовательно, качество интерпретации радарограмм на основе наиболее простого модельного примера, задающего неоднородность в виде прямоугольной полости параллельной поверхности, расположенной на глубине 0.3.

На рис. 4 представлен модельный расчет для двух параметров, характеризующих форму импульса генератора (часть a) и толщину полости. Полость расположена в границах с 1 по 3 м по профилю (см. рис. 4, δ , ϵ).

Форма импульса тока генератора на рис. 4, *a* (II), рассчитанная для параметра $C_{\theta} = 4$, характеризуется увеличенной крутизной переднего фронта импульса и его стремлением к апериодической форме на фоне роста его амплитуды [Volkomirskaya et al., 2013].

Как следует из рис. 4, *б*, *в*, при стремлении импульса к апериодической форме и увеличении крутизны фронта импульса (II, *a—в*), дифракционная картина от неоднородности приобретает более привычный облик гиперболической кривой с переотражением от границ пустоты.



Технология съемки, например, то или иное расстояние между антеннами, также влияет на отображение неоднородности в радарограмме полного поля.

На рис. 5 представлены радарограммы полного поля, рассчитанные для двух расстояний между антеннами передатчика и приемника для определения пустой полости при одинаковых формах зондирующего импульса. В данном случае при уменьшении расстояния между антеннами изображение пустотной неоднородности на радарограмме расплывается (см. рис. 5).

Рис. 6. Георадарные исследования по стенке шахты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рассмотрим примеры радарограмм, полученных георадарами серии ГРОТ 12 в шахтах Республики Беларусь (рис. 6).

На рис. 7 представлены схема эксперимента и полученные георадиолокационные данные (волновая форма и радарограмма) [Мусалев и др., 2014].



Рис. 7. Схематичный план участка проведения геофизических исследований (*a*), волновая форма на 60-м метре профиля и радарограмма, полученная при проходе от пикета 1040 до пикета 1161 по юго-западному транспортному штреку, справа колонка градации амплитуд (*б*).

a: *1* — граница целика скв. № 777г; *2* — граница зоны, в пределах которой запрещена проходка выработок; *3* — местоположение устья скв. № 777г на поверхности земли; *4* — расчетное положение ствола скважины на уровне третьего калийного горизонта по данным инклинометрии.

Как видно на рис. 7, *a*, разведочная выработка № 17 пройдена у границы водоохранного околоскважинного целика скважины № 777г, а юго-западный транспортный штрек (южный ход) на этом участке пройден в околоскважинном целике в пределах зоны, в которой действующими нормативными документами разрешена проходка одиночной горной выработки.

На радарограммах, полученных в результате выполнения исследований методом продольного профилирования по стенкам юго-западного транспортного штрека (южный ход) с различными параметрами наблюдений, в интервале профиля наблюдений от пикета 1078 до пикета 1123 (по метровой шкале — с 38 до 83 м) уверенно фиксируется дифрагированная волна, отраженная от ствола скважины. Обработка материалов шахтных георадиолокационных исследований позволила определить местоположение ствола геолого-разведочной скважины № 777г на уровне третьего калийного горизонта. Скважина находится на расстоянии 15.2 м от юго-западного транспортного штрека (южный ход) напротив пикета 1106.7 (66.7 м). Помимо этого, регистрируются отражения от соседних штреков, которые представляют собой пустотные тоннели, находящиеся на расстояниях до 18 м под разными углами к юго-западному штреку.

Видно (см. рис. 7, б), что при проходе с двухметровыми антеннами фиксируются наклонный и поперечный штреки относительно оси юго-западного транспортного штрека. Из представленных на рис. 2, 3 численных расчетов следовало, что 7-разрядного АЦП было достаточно для обнаружения штрека до глубины 7.5 м. В натурном эксперименте использовался георадар с 10-разрядным АЦП, что позволило увеличить глубину зондирования в 3 раза для обнаружения штрека.

При этом отклик от скважины, заполненной сухим цементным раствором, регистрируется отчетливо. В эксперименте [Мусалев и др., 2014] диаметр определяемой скважины составлял 0.1 м, а разница между диэлектрической проницаемостью вмещающей калийной соли и цементом внутри контрольностволовой скважины № 777 δε незначительная [Keller, Licastro, 1959]. Эксперимент показал, что с георадаром ГРОТ 12 с 2-метровыми антеннами скважина диаметром 0.1 м обнаруживается на глубине 30 м. Несмотря на слабую контрастность данной скважины по электрофизическим характеристикам ее изображение на радарограмме отчетливо визуализируется.

выводы

В работе приведены результаты расчета пространственно-временного распределения поля регистрируемого сигнала при заданной геометрии пустотной неоднородности с различной контрастностью по отношению к вмещающей среде для разных форм зондирующего импульса и разных расстояниях между передающей и приемной антеннами.

Представленные результаты численного эксперимента позволяют сделать количественные оценки зависимости параметров прибора и технологии съемки на разрешающую способность определения пустотных аномалий. Описанный алгоритм и созданная на его основе программа позволяют на фазе планирования эксперимента проводить расчет поля на поверхности с заданными параметрами тока в передающей антенне и оценку минимально требуемых технических характеристик георадара для обнаружения и локализации интересующих неоднородностей на необходимой глубине зондирования.

Показана целесообразность использования обработки данных георадиолокации, основанной на вычитании из полного поля на поверхности низкочастотной огибающей поверхностной волны, что позволяет выделять слабое поле возмущения от неоднородности на небольших глубинах, т. е. вблизи передатчика.

Показана эффективность использования моноимпульсного георадара с приемником без частотного и временного стробирования с динамическим диапазоном 140дБ на примере экспериментов в шахтах калийных солей для обнаружения малоконтрастных полостей до глубины 30 м.

ЛИТЕРАТУРА

Анур А., Старовойтов А.В., Владов М.Л. Опыт применения георадиолокации для выявления зон развития провалов в городе // Вестн. МГУ. Сер. 4. Геология, 1999, № 5, с. 55—57.

Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М., Изд-во АН СССР, 1957, 504 с.

Владов М.Л., Старовойтов А.В. Введение в георадиолокацию. М., Изд-во Моск. ун-та, 2005, 154 с.

Волкомирская Л.Б., Гулевич О.А., Варенков В.В., Резников А.Е., Сахтеров В.И. Современные георадары серии «ГРОТ» для экологического мониторинга // Экологические системы и приборы, 2012, № 5, с. 3—15.

Волович Г.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М., Изд-во «Додэка-XXI», 2005, 528 с.

Гринев А.Ю., Гигало А.И. Обратные задачи подповерхностного зондирования // Вопросы подповерхностной радиолокации. М., Изд-во «Радиотехника», 2005, с. 33—62.

Данильев С.М. Обоснование методики георадиолокационных исследований зон деструкции инженерно-геологических объектов: автореф. дис. ... к.г.-м.н. СПб., Изд-во СПбГГУ, 2011, 20 с.

Марчук В.Н., Секистов В.Н., Смирнов В.М., Юшкова О.В. Моделирование работы георадара численными методами // Вопросы подповерхностной радиолокации. М., Изд-во «Радиотехника», 2005, с. 63—82.

Мусалев Д.Н., Прохоров Н.Н., Зейтц В.Э., Барбиков Д.В., Иванова Н.Н. Определение местоположения стволов геолого-разведочных скважин на уровне продуктивных горизонтов Старобинского месторождения калийных солей // Горный журнал, 2014, № 2, с. 7—10.

Старовойтов А.В. Интерпретация георадиолокационных данных. М., Изд-во Моск. ун-та, 2008, 189 с.

Старовойтов А.В., Пятилова А.М., Шалаева Н.В., Калашников А.Ю. Выделение пустот методом георадиолокации // Инженерные изыскания, 2013, № 13, с. 26—33.

Keller G.V., Licastro R.H. Dielectric constant and electrical resistivity of natural-state cores // US Geol. Surv. Bull., 1959, 1052-H, p. 257—285.

Sommerfeld A. Uber die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphe // Ann. der Physik, 1909, v. 28, p. 665—736.

Sommerfeld A. Uber die Ausbreitung der Wellen in der drahtlosen Telegraphe // Ann. der Physik, 1926, v. 81, p. 1135–1153.

Volkomirskaya L.B., Varenkov V.V., Lyakhov G.A., Musalev D.N., Reznikov A.E., Rudenchik E.A., Sakhterov V.I. Numerical and natural experiment on georadiolocation: Prospects of applications for Lunar soil sensing // Phys. Wave Phenom., 2013, v. 21, № 3, p. 1—17.

Рекомендована к печати 26 мая 2017 г. А.Д. Дучковым Поступила в редакцию 11 января 2017 г., после доработки — 18 мая 2017 г.