

## ПАРАМЕТРЫ ЛОКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ ГЕОМЕТРИЕЙ В ВОЛНОВОМ ПОЛЕ ГЕОРАДИОЛОКАЦИИ

А. И. Родионов, П. А. Рязанцев, И. С. Киброев

*Институт геологии — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук" (ИГ КарНЦ РАН), г. Петрозаводск*

Поступила в редакцию 7 декабря 2018 г.

**Аннотация:** статья рассматривает проблематику применения георадиолокации для поиска локальных тел, таких как инженерные коммуникации. С целью определения критериев оценки по радарограммам глубины залегания искомых объектов выполнен лабораторный эксперимент, в котором воссозданы условия залегания в песчаном грунте линейно вытянутых трубопроводов из разных материалов. В ходе эксперимента локальные объекты меняли свое пространственное расположение за счет поворота вокруг своей оси с шагом  $10^\circ$ . Для каждой поворотной позиции с помощью высокочастотной георадарной антенны получена радарограмма, позволяющая оценить глубину залегания искомого объекта по гиперболе дифрагированной волны. В результате исследований установлено, что пространственное положение линейно вытянутых локальных объектов оказывает значительное влияние на явление дифракции электромагнитной волны. Показано, что при пересечении линии коммуникаций под углом менее  $60^\circ$  такой объект перестает быть точечным и гипербола не формируется. Использование стандартного подхода по определению диэлектрической проницаемости вмещающей среды по гиперболе образованной в условиях не перпендикулярного пересечения направления линии трассы может приводить к погрешности до 50 %. Полученные выводы позволяют заключить о необходимости выполнения серии профилей при работе с линейно вытянутыми инженерными коммуникациями, а также недопустимости определения диэлектрической проницаемости на радарограммах по единичным гиперболам.

**Ключевые слова:** георадиолокация, моделирование, дифракция, радарограмма, линейные объекты.

### DETERMINATION OF LOCAL OBJECTS WITH CHANGING GEOMETRY IN A WAVE FIELD OF GPR. A PHYSICAL APPROACH

**Abstract:** the article deals with problem of GPR using for local bodies searching, such as engineering communications. In order to determine the evaluation criteria for the radarograms of the desired objects occurrence depth, a laboratory experiment was performed. In the experiment the conditions of occurrence in sandy soil of linearly elongated pipelines from different materials were recreated. The local objects change their spatial location due to the rotation around its axis in  $10^\circ$  step. For each turning position with the help of high-frequency GPR antenna obtained radar images, which allows to estimate the depth of the desired object by the analysis of diffracted wave hyperboles. As a result of research it is established that the spatial position of linearly elongated local objects has a significant impact on the phenomenon of electromagnetic wave diffraction. It is shown that at the intersection of the communication line at an angle of less than  $60^\circ$  such object ceases to be point and hyperbole is not formed. The use of a standard approach to determine the permittivity of the host medium on the hyperbole formed under conditions not perpendicular to the intersection of the direction of the route line can lead to an error of up to 50%. The findings allow us to conclude about the need to perform a series of profiles when working with linearly extended engineering communications, as well as the inadmissibility of determining the dielectric constant on radar images using single hyperboles.

**Keywords:** ground-penetrating radar, modeling, wave diffraction, radar images, linearly elongated local objects.

### Введение

Методы геофизики позволяют решать разнообразные задачи при выполнении инженерно-геологических изысканиях, их использование регламентируется СП 47.13330. Одним из методов, который применяется при оценке строения грунтового массива, неразрушающем контроле сооружений, или поиске локальных объектов является георадиолокация. Существует множество успешных примеров использования георадара для выявления неоднородностей геологической среды [1]. Наряду с этим, остро стоит проблема достоверности интерпретации данных георадиолокации, что обусловлено дисперсией электрофизических свойств грунтов [2]. От правильного определения такого рода параметров может зависеть насколько точно результаты, полученные после интерпретации материалов георадиолокационных изысканий, будут совпадать с реальными инженерно-геологическими условиями. Одним из способов решения задач по повышению достоверности обработки и интерпретации является выполнение лабораторных экспериментов, позволяющих определить характеристики волнового поля при изучении конкретных обстановок [3, 4]. Цель данной работы заключается в оценке степени влияния геометрии залегания линейно вытянутых объектов на регистрируемое волновое поле георадиолокации, а так же в изучении особенностей определения диэлектрической проницаемости по гиперболам дифрагированной волны.

### Методы и подходы

Метод георадиолокации основан на изучении распространения электромагнитной волны в среде, на основе определения параметров скорости волны ( $V$ ) и комплексной диэлектрической проницаемости вещества ( $\epsilon$ ). Георадиолокационные исследования осуществляются с помощью специализированных приборов – георадаров. Одной из частей георадара является передающая антенна, генерирующая электромагнитные волны определенной частоты. Излучаемые волны в виде короткого наносекундного импульса передаются в исследуемую среду, где отражаются от внутренних границ и неоднородностей. Отражения фиксируются с помощью приемной антенны и передаются на автоматический цифровой преобразователь. Полученные данные формируют трассу электромагнитного сигнала, показывающие как изменялся принимаемый сигнал с течением времени. Набор трасс формирует радарограмму, которая содержит информацию о поведении волнового поля. Скорость распространения электромагнитного сигнала, его затухание и интенсивность отражения, зависит от физических свойств изучаемой среды, таких как электропроводность, плотность, а так же водонасыщенность. На границах сред или в среде характеризующейся наличием физических неоднородностей формируются фазовые экстремумы. Экстремумы соединяются между собой условными линиями, формируя оси синфазности. Анализ осей синфазности позволяет сделать вы-

воды о слоистости среды, выделить литологические или иные неоднородности, а также определить присутствуют ли в ней локальные объекты.

Выделение локальных объектов напрямую зависит от вертикальной и горизонтальной разрешающей способности метода. Вертикальная разрешающая способность связана с длиной волны электромагнитного импульса ( $\lambda$ ) в конкретной среде и вычисляется по формуле [1]:

$$\lambda = \frac{c}{\omega\sqrt{\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме,  $\epsilon$  – величина относительной диэлектрической проницаемости зондируемой среды, а  $\omega$  – центральная частота электромагнитной волны.

На вертикальную разрешающую способность влияет величина  $\omega$ . Этот параметр меняется в зависимости от конструкции антенного блока и устанавливается изготовителем. По величине  $\omega$  антенные блоки разделяют на низкочастотные – работающие в частотных диапазонах от 25 до 300 МГц и условно высокочастотные, чей рабочий диапазон составляет порядка 1 ГГц. Высокочастотные антенные блоки обладают высокой разрешающей способностью при малых глубинах проникновения сигнала (до 1,5 м), низкочастотные наоборот – малой разрешающей способностью, но большей глубиной (до 30 м).

Поиск и обнаружение локальных объектов, таких как трассы и коммуникации, являются рядовой задачей для георадиолокации при выполнении инженерно-геофизических изысканий. В волновом поле их выделение возможно за счет явления дифракции электромагнитной волны. При наличии в среде локальных объектов удовлетворяющих условиям неравенства (2), на радарограммах фиксируются оси синфазности имеющие характерную форму в виде гиперболы [4].

$$\frac{\lambda}{4} < L < \frac{\lambda}{2}, \quad (2)$$

где  $L$  – размер локального объекта по вертикальной плоскости.

Дифрагирующим объектом также могут быть участки, обладающие значительным контрастом электрофизических свойств, например трещины в скальных массивах или краевые части границы раздела сред. Наличие на радарограммах гипербол позволяет интерпретатору получить сведения о скоростных характеристиках среды, вмещающей локальный объект. Для этого решается уравнение годографа дифрагированной волны [3]

$$t = \frac{2 \cdot \sqrt{x^2 + h^2}}{V}, \quad (3)$$

где  $t$  – время точки на оси синфазности, снятое с радарограммы,  $h$  – глубина расположения дифрагирующего объекта,  $x$  – расстояние от точки над объек-

том до точки приема,  $V$  – скорость распространения волн в слое над объектом.

Данная формула встроена в большинство программ, применяемых при интерпретации георадиолокационных данных. Ее решение проходит в полуавтоматическом режиме и сводится к определению значения  $\epsilon$ , учет которого позволяет перевести полученный временной разрез в глубинный. Кроме того, за то каким образом локальный объект будет выделяться на радарограммах, отвечает радиус первой зоны Френеля ( $R_{\phi}$ ). Если в длину объекта укладывается несколько  $R_{\phi}$ , то на радарограммах он будет фиксироваться как линейно вытянутая ось синфазности, если меньше чем один то, как гипербола дифрагированной волны [3].

Для упрощения процесса интерпретации георадиолокационных данных применяется множество приемов. Одним из них является определение волновых картин характерных для конкретных геологических обстановок – так называемых поисковых образов [5, 6]. Подобные образы могут быть получены в ходе построения математических моделей или при выполнении натуральных экспериментов. Результаты, получаемые в ходе физического моделирования, зачастую лучше соотносятся с реальными условиями в сравнении с результатами математических расчетов, что обусловлено трудностью учета всех физических характеристик среды, которые в значительной степени влияют на получаемые волновые картины.

Варианты исполнения и формы измерительных ячеек для физического моделирования весьма разнообразны и напрямую зависят от преследуемых исследователями целей и задач. Наиболее распространенным является применение бака или емкости, заполненного материалом, моделирующим среду. В ячейку вносятся неоднородности необходимой конфигурации обладающие известными физическими свойствами

ми, после чего изучается характер их влияния на волновое поле георадиолокации. Сбор данных, как правило, проводится при помощи высокочастотных георадарных антенн (1–2,5 ГГц).

Актуальность применения моделирования для решения научно-практических и практических задач широко освещается в литературе. В качестве примеров, можно привести научные работы, в которых изучались: миграция загрязнения среды нефтепродуктами [7]; фазовые изменения сигнала при анализе трещин скального массива разного размера и заполнения [8]; оценка крупности гравийной составляющей ПГС [9]; поглощающие свойства среды [10]; влияние поляризации сигнала при поисках локальных объектов [11]; мощность жил льда [12]. Помимо этого существует ряд примеров, связанных с углубленным изучением явления дифракции, например исследования, выполненные коллективом авторов, приведенные в статьях [13, 14], где описывают результаты, полученные в рамках разработки подходов по дистанционному изучению планет солнечной системы.

#### Методика и аппаратура

Лабораторный эксперимент, выполнялся в измерительной ячейке, представленной пластиковым баком габаритами 1600x500x400 мм (рис. 1). В качестве вмещающей среды использовался сухой кварцевый песок и водопроводная вода. Съемка выполнялась георадаром ОКО 2, оснащенный антенным блоком АБ 1700 с центральной частотой антенны 1700 МГц и с заявленной изготовителем разрешающей способностью  $\pm 30$  мм. Данные регистрировались и обрабатывались в программном обеспечении GeoScan 32. Развертка по глубине составляла 32 нс, величина накопления сигнала 8. Съемка проводилась по сети профилей, расположенных вдоль всей длины бака, расстояние между профилями составляло 70 мм.

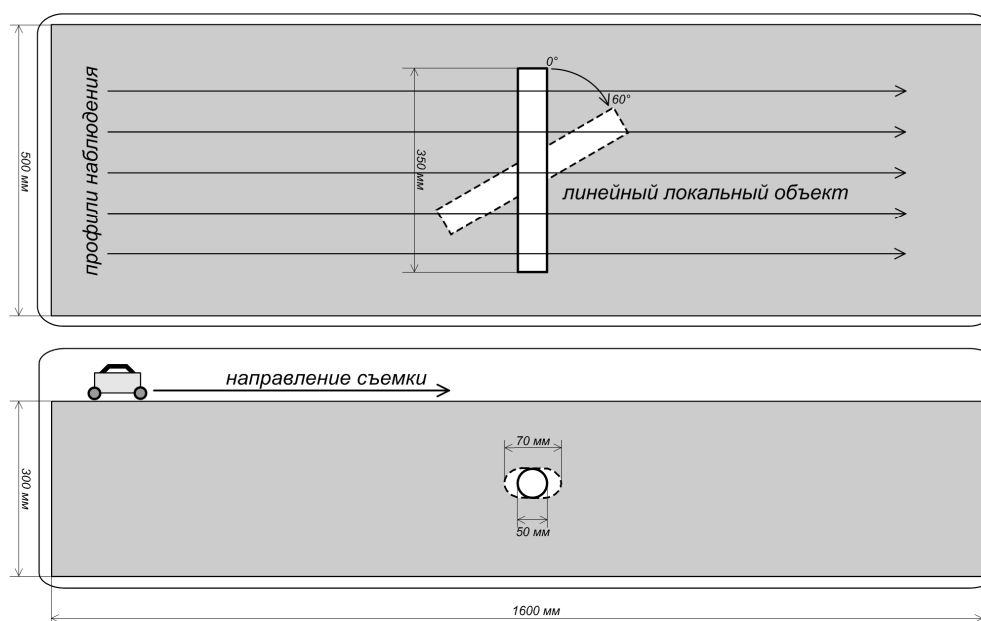


Рис. 1. Схема измерительной ячейки.

В ходе первого этапа бак был наполнен песком, мощность которого составила 300 мм. Песок средне-мелкозернистой фракции (ГОСТ 8736-9), со следующим минеральным составом: кварц – 72 %, плагиоклаз – 24 %, глинистое вещество – 2 %, тонкозернистые агрегаты – 2 %. Модуль крупности песка – 1,67, коэффициент фильтрации – 6,5 м/сут. Эксперимент включал в себя моделирование двух объектов, на которых формировалась гипербола: стальной брусок размерами 25х25х400 мм и полая пластиковая труба 50х50х350 мм. Изначально объекты располагались на глубине 150 мм перпендикулярно георадарным профилям, а по ходу работ выполнялось вращение в горизонтальной плоскости с шагом 10° и регистрация радарограмм. Известная глубина залегания отражающей границы, сформированной дном бака, позволила рассчитать параметры для электромагнитной волны в среде  $V = 16$  см/нс,  $\epsilon = 3,5$ .

На втором этапе, для моделирования работ на акваториях часть песка была изъята из бака, после чего емкость была наполнена водой на 300 мм, при мощности оставшегося песка в 100 мм. Локальные объекты были помещены на песчаное дно модели, после чего изучены по такой же методике, как и на первом этапе. Для водной среды параметры электромагнитной волны составили  $V = 3,3$  см/нс,  $\epsilon = 81$ .

Так как в дальнейшем производится сопоставление диэлектрической проницаемости, полученной исходя из известной глубины залегания подошвы вмещающей среды, с диэлектрической проницаемостью, наблюдаемой по гиперболе дифрагированной волны, для них вводятся соответствующие обозначения  $\epsilon$  и  $\epsilon_d$ .

### Результаты исследования

По итогам выполненных наблюдений был получен набор радарограмм, отражающий изменение гипербо-

лы дифрагированной волны в зависимости от угла поворота локального объекта (рис. 2). Рассмотрим результаты, полученные в песчаном заполнителе. На рис. 2а показана радарограмма для перпендикулярного положения металлического бруска относительно хода георадарной антенны (угол поворота 0°). Для данной модели  $\epsilon_d = 3,28$ , что близко к нормальному значению  $\epsilon$ . На рис. 2б локальный объект повернут на 30° по горизонтальной оси. При изменении конфигурации заложения бруска поменялась геометрия крыльев гипербола, маркирующей локальный объект. Гипербола стала положе, а значение  $\epsilon_d$  составило 2. На рис. 2в угол поворота составляет 60°, при этом гипербола продолжает выполаживаться, значение  $\epsilon_d$  изменилось и составило 1,4. Рис. 2г соответствует волновому полю, при котором локальный объект расположен под углом 90° относительно своего первоначального положения. При такой конфигурации от объекта вместо единичной гипербола сформировалась отчетливая отражающая граница – линейная ось синфазности показывающая его пространственное расположение. Явление дифракции фиксируется не явно, гипербола проявлены слабо и фиксируются в крайних точках залегания бруска. При таком положении установить  $\epsilon_d$  по гиперболе не представилось возможным.

При использовании пластиковой трубы получены схожие волновые картины и значения  $\epsilon_d$  с углами вплоть до 60° (рис. 2д, е). В свою очередь, при повороте на 60° и более, труба перестала идентифицироваться на радарограммах как точечный источник (рис. 2ж, з) и приобрела вид линейно вытянутой оси синфазности. Наблюдаемый эффект образования линейной оси синфазности при меньших углах поворота для пластиковой трубы можно связать с ее большим радиусом в сравнении с металлическим бруском и, как следствие, более быстрым переходом, к граничным условиям, показанным в уравнении (2).

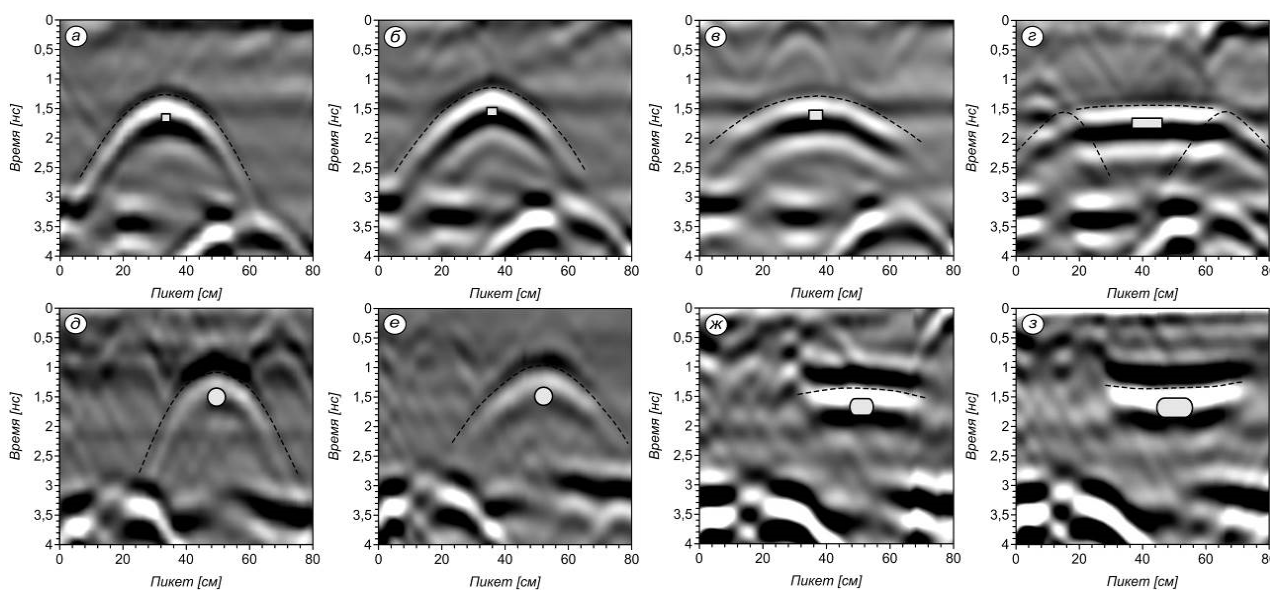


Рис. 2. Фрагменты радарограмм с локальным объектом в песке: металлический брусок – а) угол 0°, б) угол 30°, в) угол 60°, г) угол 80°; пластиковая труба – д) угол 0°, е) угол 30°, ж) угол 60°, з) угол 80°.

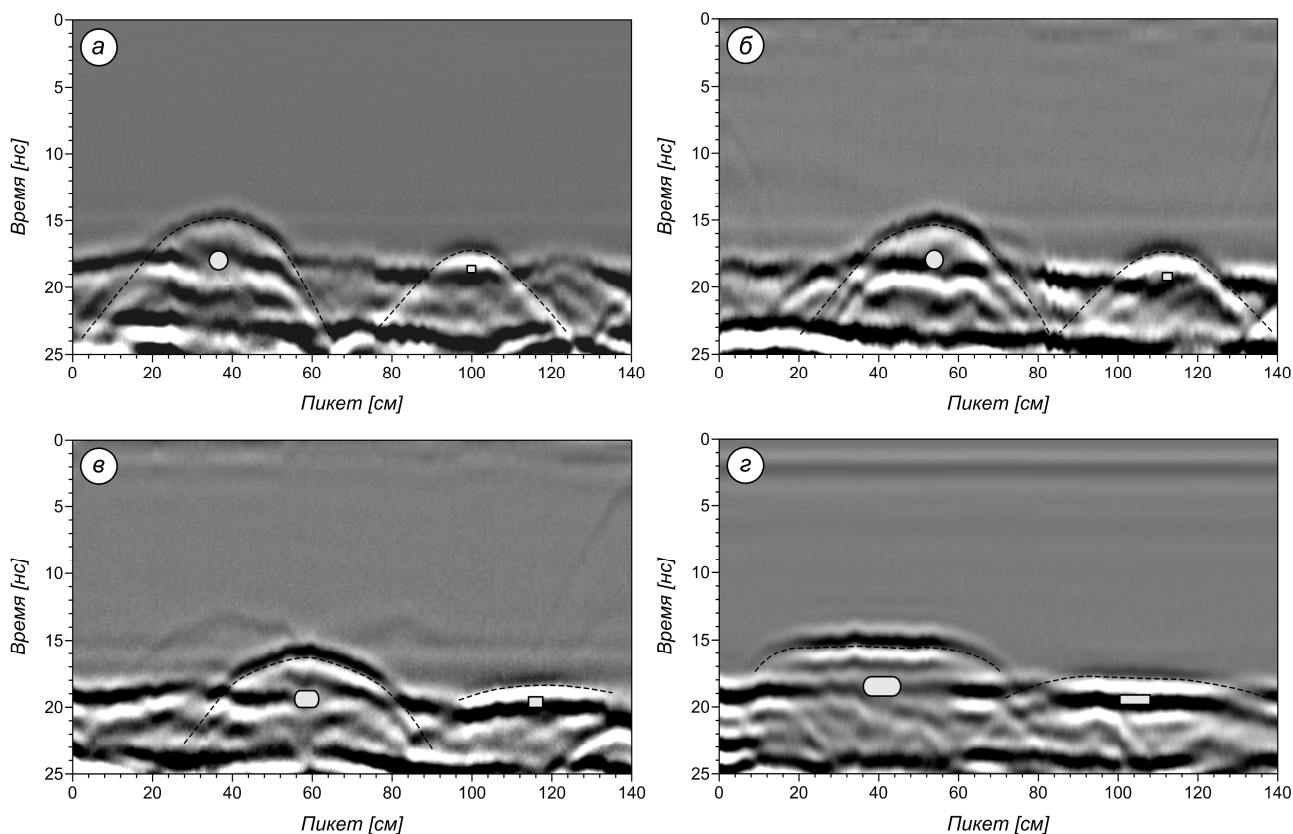


Рис. 3. Радарограммы с локальными объектами в воде (пластиковая труба слева, металлический брусок справа): а – угол 0°, б – угол 30°; в – угол 60°; г – угол 80°.

На рис. 3 приведены радарограммы, полученные для бруска и трубы, которые расположены в заполненном водой баке. Важно отметить, что смена электрофизических свойств вмещающей среды оказала влияние на параметр  $\lambda$ , который изменился с 10 см в песке до 2 см в воде. В общем виде, при повороте объектов происходит схожее изменение характера протекания дифракции, что и в случае использования песка в качестве вмещающей среды. Нормальное значение  $\epsilon_d$  при перпендикулярном расположении относительно профиля составило 80 ( $V=3,3$  см/нс). И труба, и брусок уверенно выделяются на радарограммах, при этом получившиеся гиперболы различны как по форме, так и по интенсивности, что обусловлено их физическими свойствами и геометрическими размерами. Например, эффект дифракции для трубы уверенно маркируется на радарограммах на протяжении всего эксперимента. В случае бруска при углах поворота более 60°, соотносящиеся с ним оси синфазности сливаются с осями от подстилающего песка, что обусловлено меньшими вертикальными размерами в сравнении с трубой.

Отдельно следует рассмотреть динамические параметры отраженного сигнала, которые для используемых объектов имеют явные отличия. Такие отличия заключаются в разности фаз регистрируемого сигнала (т.е. отраженный импульс от трубы начинается с условной фазы «-» – белый цвет, а от бруска «+» – черный цвет), а также в том, что при критических

углах (более 60°) положение бруска отчетливо выделяется лишь по повышенным значениям амплитуды сигнала (в 1,5 раза больше). Указанные эффекты демонстрируются на рис. 4. Возникновение подобных эффектов обусловлено различными соотношениями между диэлектрическими проницаемостями изучаемых объектов и вмещающих их сред ( $\epsilon$  пластика весьма низка, а у металлического бруска  $\epsilon \rightarrow \infty$ ). В целом, анализ динамических параметров может использоваться при разделении коммуникаций по составу, позволяя отличить металлические трубы от пластиковых.

### Обсуждение результатов

По итогам выполнения эксперимента было установлено влияние геометрических параметров линейных локальных объектов на регистрируемую волновую картину. Зависимость  $\epsilon_d$  наблюдаемой по гиперболам дифрагированной волны от угла поворота приводится в виде графиков на рис. 5. На графиках видно, что существенный рост линейных размеров отражающей площадки начался при углах поворота более 40° к оси профиля, как для пластиковой трубы, так и металлического бруска (рис. 5а). В результате, это привело к нарушению условий возникновения дифракции (2) и, как следствие, постепенной трансформации волнового поля. На записи происходит переход от единственной гиперболы к комплексу, который включает центральную ось синфазности и две крайние

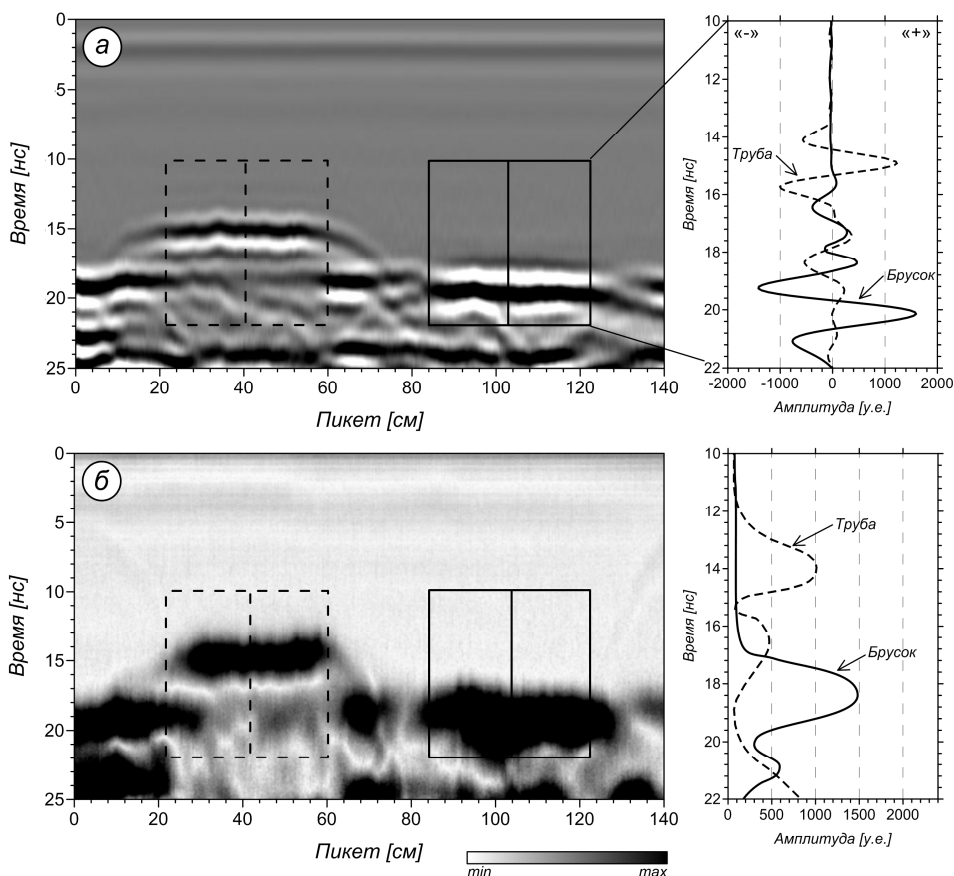


Рис. 4. Динамические параметры пластиковой трубы и металлического бруска при угле поворота 80°: а – изменение фазы, б – разность амплитуд.

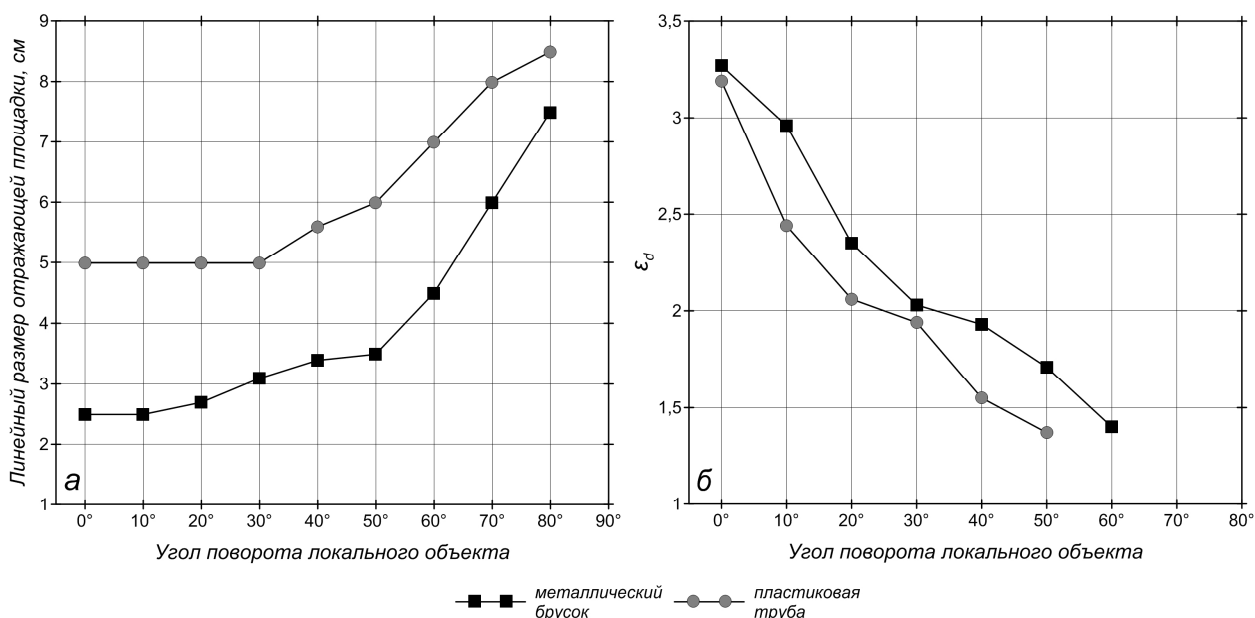


Рис. 5. Влияние угла поворота линейного локального объекта: а – зависимость размеров отражающей площадки от угла поворота; б – зависимости  $\epsilon_d$  от угла поворота.

гиперболы. Важно отметить, что визуально на радарограммах такие изменения наблюдаются только при углах более 50° (рис. 2). То есть до определенного угла комплекс отражений на записи может восприни-

маться интерпретатором как единичная гипербола, что приводит к определению  $\epsilon_d$  со значительной ошибкой. При углах же более 60° определение диэлектрической проницаемости по гиперболам стано-

вится технически невозможным (рис. 5б).

Полученные выводы о трансформации волновых картин совпадают с результатами математического моделирования, которые приводятся в работе [15], где демонстрируется зависимость между величиной  $R_{\phi}$  и линейными размерами локальных объектов и как она влияет на формирование дифрагированной волны.

Важным результатом выполненных работ является оценка возможной погрешности при определении  $\epsilon_d$  вследствие поворота линейного объекта. На рис. 6 приведены оцифрованные гиперболы дифрагированной волны и значения  $\epsilon_d$ , соответствующие им при разных углах поворота, для разных вмещающих сред. Для оценки влияния погрешности рассчитано, на ка-

кой глубине маркировалась бы отражающая граница бака, в случае если бы за  $\epsilon$  среды было взято  $\epsilon_d$ . Установлено, что разница между  $\epsilon$  и  $\epsilon_d$  может приводить к ошибке определения глубины залегания отражающих границ. Значение погрешности, в условиях использования высокочастотной георадарной антенны, по оценке достигают 60 % в сторону увеличения, в сравнении с истиной глубиной залегания. При использовании относительно низкочастотных георадарных антенн (применяемых при изучении реальных геологических сред) такая ошибка будет еще больше, что может привести к полному несоответствию между данными, полученными после интерпретации радарограмм и исследуемым геологическим разрезом.

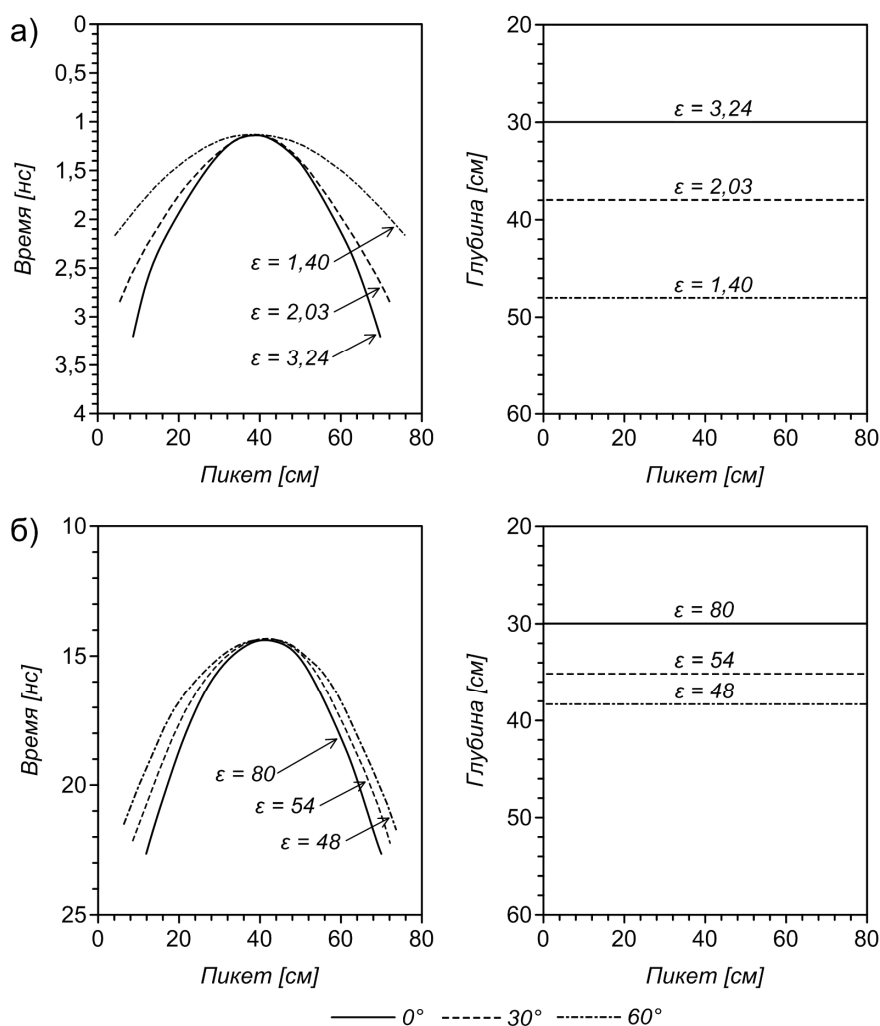


Рис. 6. Изменение характера дифракции при повороте локального объекта (слева – гиперболы при разных углах, справа – ошибка определения дна): а – вмещающая среда – песок; б – вмещающая среда – вода.

### Выводы

В результате проведенных исследований на примере физического моделирования показано влияние геометрических параметров и ориентировки локальных линейных объектов на волновое поле георадиолокации и значения диэлектрической проницаемости, определяемой по гиперболом дифрагированной

волны. Важность полученных данных обусловлена тем, что выявленные гиперболы при интерпретации являются одним из основных источников информации об электрофизических свойствах изучаемой среды. Демонстрируемая изменчивость может приводить к погрешности при пересчете временного разреза в глубинный и оценке глубины залегания отра-

жающих границ.

Особый риск возникновения ошибки (вплоть до 30 %) возможен в случае исследования линейных коммуникаций в грунтах с высокой вариацией диэлектрической проницаемости (например, пески влажные  $\epsilon = 20$ , сухие  $\epsilon = 4$ ) и при пересечении линейного объекта георадарным профилем под острым углом, так как визуально трансформация гиперболы не определяется. Одним из способов учета подобного явления может служить выполнение серии параллельных профилей в области обнаружения четких гипербола. Это позволит определить  $\epsilon$  по набору гипербола, а также оценить геометрию локального объекта и, при необходимости, изменить азимут профилей с целью перпендикулярного пересечения линейного источника дифрагированной волны.

Кроме того, исследованиями установлено, что материал исполнения локального объекта оказывает влияние на получаемые данные. Сопоставление материалов, полученных при профилировании над пластиковой трубой и металлическим брусом, свидетельствует о смене фазы и изменении амплитуды регистрируемого отраженного сигнала вследствие различий в отражающих характеристиках указанных объектов.

Такие данные показывают перспективы использования динамических параметров георадарного сигнала для выявления материала трубопроводов в естественном залегании. Полученные результаты могут найти прямое применение в инженерно-геофизических изысканиях, связанных с поиском и трассировкой линейных коммуникаций (трубопроводы, кабель-каналы и т.д.).

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-35-00020 «Изучение параметров георадарного сигнала при физическом моделировании разных геологических условий».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Владов, М. Л. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие / М. Л. Владов, А. В. Старовойтов. – Москва: Издательство МГУ, 2004. – 153 с.

*Институт геологии — обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра "Карельский научный центр Российской академии наук" (ИГ КарНЦ РАН), г. Петрозаводск*

*Родионов Александр Игоревич, младший научный сотрудник  
E-mail: fabian4695@gmail.com; Тел.: +7 911 415 83 62*

*Рязанцев Павел Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник  
E-mail: chthonian@yandex.ru; Тел.: +7 906 207 44 56*

*Киброев Илья Сергеевич, старший лаборант-исследователь, студент 4 курса ПетрГУ  
E-mail: ilyakibroev@mail.ru; Тел.: +7 906 207 28 77*

2. Аузин, А. А. О дисперсии диэлектрической проницаемости геологической среды (применительно к интерпретации материалов метода георадиолокации) / А. А. Аузин, С. А. Зацепин // Вестник Воронеж. гос. ун-та. – Сер.: Геология. – 2015. – № 4. – С. 122–127.

3. Старовойтов, А. В. Интерпретация георадиолокационных данных. Учебное пособие / А. В. Старовойтов. – Москва: Издательство МГУ, 2008. – 187 с.

4. Изюмов, С. В. Теория и методы георадиолокации. Учебное пособие / С. В. Изюмов, С. В. Дручинин, А. С. Вознесенский. – М.: Издательство «Горная книга», 2008. – 196 с.

5. Jol, H. Ground Penetrating Radar Theory and Applications / H. Jol // Elsevier Science, 2009. – 544 p.

6. Daniels, D. J. Ground Penetrating Radar. 2nd edition / D. J. Daniels. – London : UK. IEE Press, 2004. – 726 p.

7. Temporal GPR imaging of an ethanol release within a laboratory-scaled sand tank / D. R. Glaser [et al.] // Journal of Applied Geophysics. – 2012. – V.86. – P. 133–145.

8. Markovaara-Koivisto, M. The effect of fracture aperture and filling material on GPR signal / M. Markovaara-Koivisto, T. Hokkanen, E. Huuskonen-Snickner // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. – 2014. – V.73. – P. 815–823.

9. Родионов, А. И. Оценка параметров георадарного сигнала в условиях физического моделирования песчано-гравийной смеси / А. И. Родионов, П. А. Рязанцев // Геофизика. – 2017. – №6. – С. 57–64.

10. Владов, М. Л. Оценка поглощающих свойств среды при георадиолокационных исследованиях в лабораторных условиях / М. Л. Владов, А. М. Пятилова // Геофизика. – 2015. – №6. – С. 55–60.

11. Sagnard, F. Using polarization diversity in the detection of small discontinuities by an ultra-wide band ground-penetrating radar / F. Sagnard, E. Tebchranly // Measurement. – 2015. – V.61. – P. 129–141.

12. Титов, А. В. Физическое моделирование распространения георадарных сигналов при решении геокриологических задач / А. В. Титов, Д. И. Петлеваний, С. С. Крылов // Инженерные изыскания. – 2014. – №12. – С. 10–16.

13. GPR Detectability of rocks in a Martian-like shallow subsurface: A numerical approach / G. Valerio [et al.] // Planetary and Space Science. – 2012. – V.62. – P. 31–40.

14. Estimation of subsurface dielectric target depth for GPR planetary exploration: Laboratory measurements and modeling / S. Lauro [et al.] // Journal of Applied Geophysics. – 2013. – V.93. – P. 93–100.

15. Neidell, N. S. Stratigraphic modeling and interpretation / N. S. Neidell, F. Poggiagliolmi // Applications to Hydrocarbon Exploration. – 1977. – P. 389–416.

*Institute of Geology Karelian Research Center Russian Academy of Science, Petrozavodsk*

*Rodionov A. I., junior researcher  
E-mail: fabian4695@gmail.com  
Tel.: +7 911 415 83 62*

*Ryazantsev P. A., PhD, senior researcher  
E-mail: chthonian@yandex.ru  
Tel.: +7 906 207 44 56*

*Kibroev I. S., laboratory assistant, 4<sup>th</sup> year student of PetrSU  
E-mail: ilyakibroev@mail.ru  
Tel.: +7 906 207 28 77*