

## Физическое моделирование георадиолокационного поля в прямой и обратной задачах электродинамики

© Д. Т. Одилавадзе, Т. Л. Челидзе, 2013

Институт геофизики Тбилисского государственного университета  
им. И. Джавахишвили, Тбилиси, Грузия

Поступила 24 октября 2012 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Метод фізичного моделювання, який застосовують для розв'язання задач електродинаміки, з успіхом можна використовувати під час розв'язання задач георадіолокації з метою моделювання надвисокими частотами електромагнітних полів високочастотного діапазону. Визначено коефіцієнти подібності частот і геометричних довжин для фізичного моделювання в лабораторних умовах стосовно польових умов дослідження георадіолокації з штатними антенами георадара «Зонд-12е».

A method of physical simulation used in solving electrodynamics problems can be successfully used while solving the problems of georadiolocation for modeling electromagnetic fields of high frequency range with the help of super-high frequencies. The values of similarity coefficients of frequencies and geometric lengths in case of physical simulation under laboratory conditions have been found with regard to field conditions of georadiolocation studies with standard antennas of geo-radar «Zond-12e».

Георадиолокационные исследования часто встречаются с проблемой определения радиобраза объектов неопределенных форм (рис. 1). Особенно часто подобные вопросы

возникают при георадиолокационных работах над подповерхностными пустотами в археорадиолокации (погребенные объемы остатков зданий, перекрытия, ограниченные

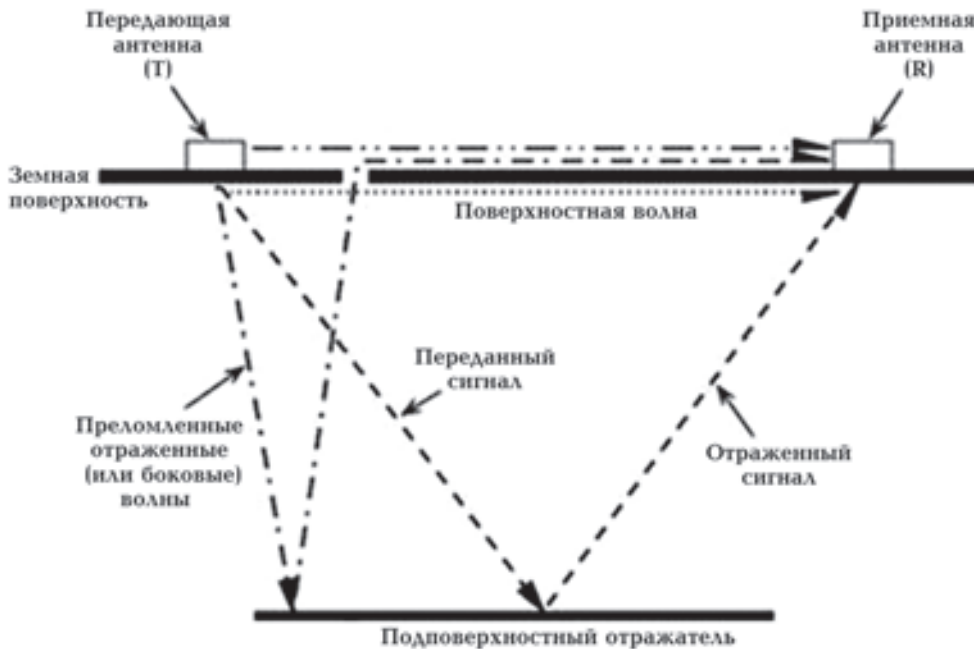


Рис. 1. Схема действия георадара; показаны основные направления распространения (излучения и приема) радиоволн.

фундаментами), геотехника (техногенные объемы типа туннелей, подземных переходов, подземных убежищ), выявлении карстовых пустот. Такие подземные пустоты, полностью или частично заполненные водой, представляют интерес при геолого-спелеологических исследованиях.

Цель настоящей статьи — обоснование применимости физического моделирования при

георадиолокационных исследованиях: определение параметров модели и ее уточнение (прямая задача) или же установление структуры по своему радиообразу с использованием коэффициентов подобия (обратная задача).

Физическое моделирование началось интенсивно применяться в геофизике с 70-х годов прошлого века многими авторами и пользовалось значительной популярностью исследователей

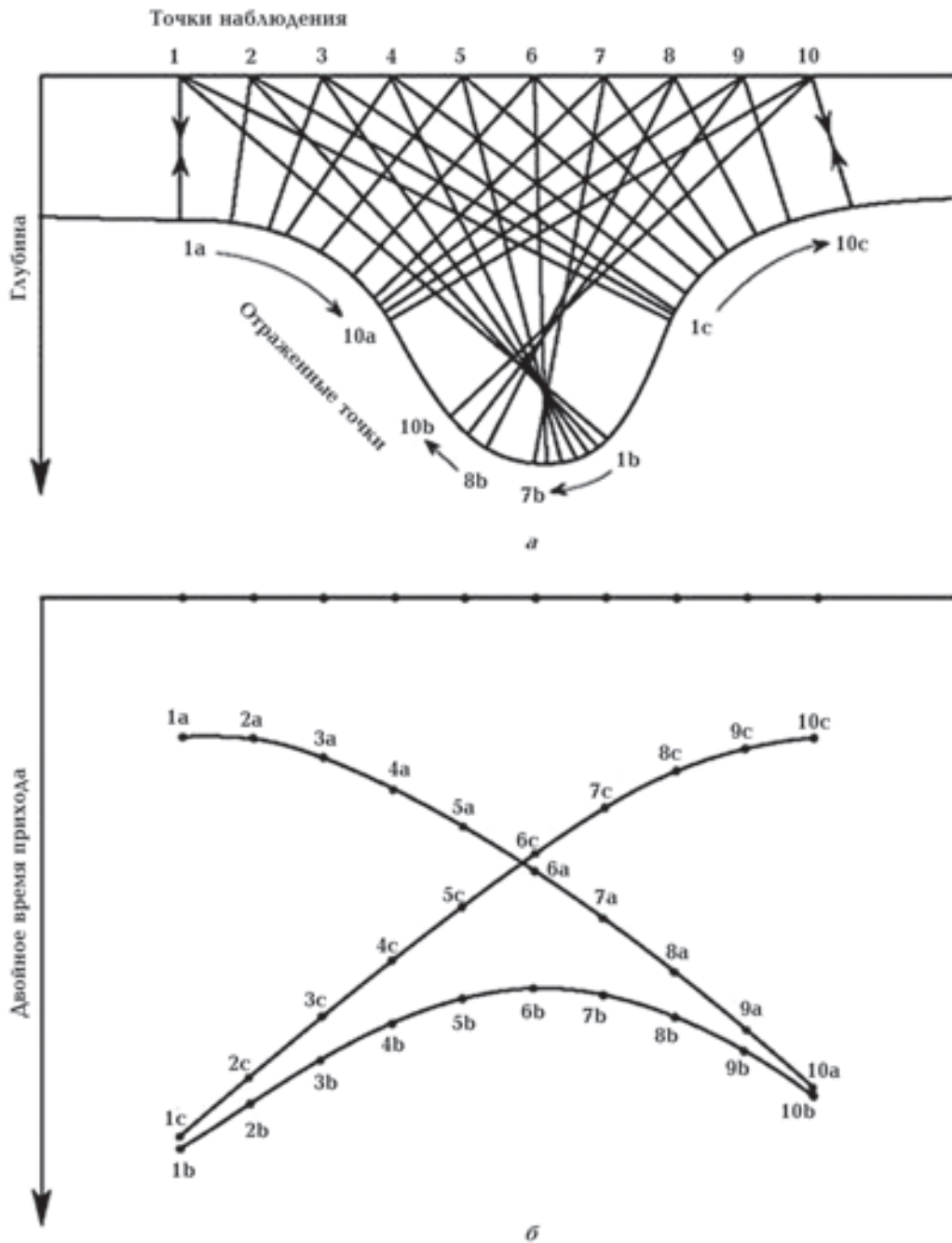


Рис. 2. Схематическое изображение перекрытой симметричной полости (а) и лучевого пересечения (bow-tie) на радиообразе модели для времен пробега вдоль лучей (б) [Neal, 2004].

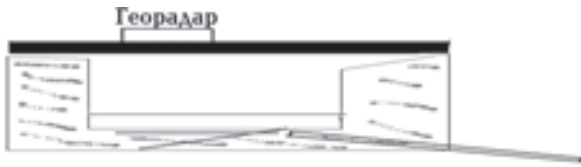


Рис. 3. Физическая модель: моделируемая полость ограничена с боков зацементированной кирпичной кладкой, опирающейся на бетонное слабоармированное дно. Полость сверху перекрыта базальтовой плитой. Показана также приемно-передающая антенна (центральная частота 2 ГГц) георадара «Зонд-12 е».

[Negi, Gupta, 1968; Odilavadze, Tatishvili, 1988; Sena D'Anna, 2004; Gürel, Oğuz, 2012; Czaja, 2012].

Из уравнений Максвелла [Ganiard, 1953; Бурсиан, 1972; Бердичевский и др., 1987; Sharma, 1997; Neal, 2004] можно получить закон электродинамического подобия, согласно которому две электродинамические системы подобны и результаты одной могут быть применены к другой системе (т. е. лабораторное моделирование распространяет свои заключения на подобные явления измененного масштаба) при соблюдении условий подобия электромагнитных явлений:

$$f_m^2 \mu_m \varepsilon_m l_m^2 = f_n^2 \mu_n \varepsilon_n l_n^2, \quad (1)$$

$$f_m \mu_m \sigma_m l_m^2 = f_n \mu_n \sigma_n l_n^2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — диэлектрическая постоянная;  $f$  — частота;  $\mu$  — магнитная проницаемость;  $\sigma$  — проводимость;  $l$  — линейный размер;  $m$  — параметры

модели;  $n$  — параметры природы. В отличие от магнитотеллурики в георадиолокационных исследованиях в определенных условиях (при рассмотрении сред типа воздух—вода—минеральный скелет и незначительной зависимости диэлектрической проницаемости и проводимости вмещающей среды от частоты) возможны значительные упрощения. Для большинства геологических сред магнитную проницаемость можно принять равной единице и удовлетвориться в первом приближении условием подобия георадиолокационного поля:

$$f_m^2 \varepsilon_m l_m^2 = f_n^2 \varepsilon_n l_n^2. \quad (3)$$

Можно пойти по пути еще большего упрощения и допустить равенство диэлектрических проницаемостей для модели и природы. Тогда для геометрии модели и природы справедливо соотношение

$$f_m^2 l_m^2 = f_n^2 l_n^2.$$

В таком случае коэффициент подобия  $K_f = K_l$  определяют из уравнений

$$f_m l_m = f_n l_n,$$

$$\frac{f_m}{f_n} = \frac{l_n}{l_m},$$

$$K_f = K_l = \frac{f_m}{f_n} = \frac{l_n}{l_m}.$$

Следовательно, можно применять СВЧ (ги-

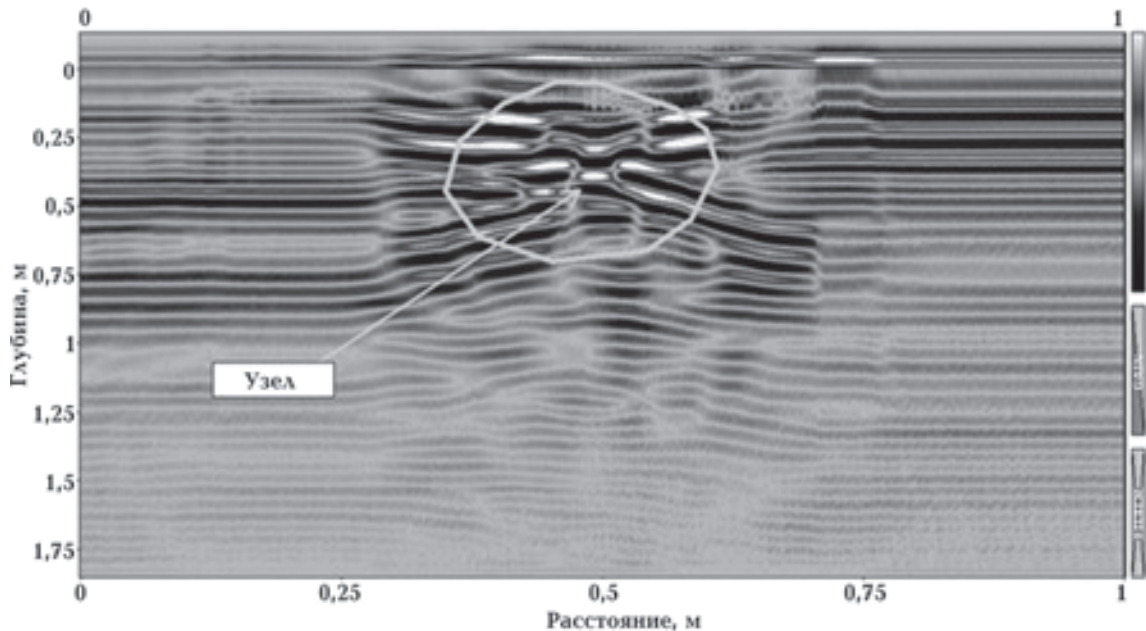


Рис. 4. Радарограмма для пустой полости, т. е. внутренняя часть занята только воздухом.

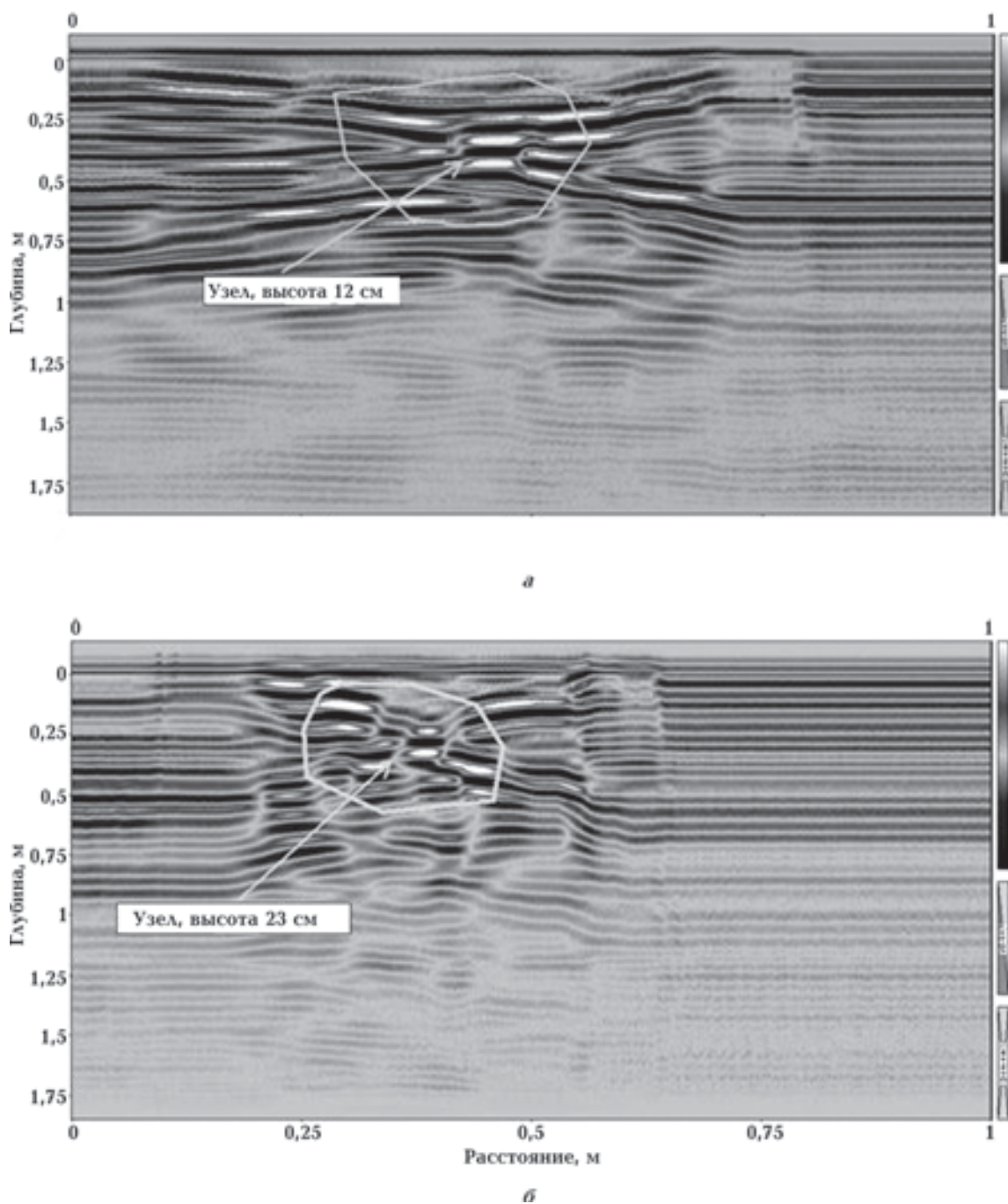


Рис. 5. Радарограмма для заполненной на 12 (а) и 23 (б) см водой полости.

гагерцовые) антенны георадара для лабораторного моделирования натуральных ситуаций, где используются мегагерцовые частоты. Например, в лабораторной модели можно использовать частоту 2 ГГц при линейном размере искомого объекта 1 м (прямая задача моделирования), что соответствует в натуре области с линейным размером 50 м при частоте 38 МГц (обратная задача). Далее, для тех же параметров

модели при использовании частоты 75 МГц в натуре линейный размер исследуемого объекта соответствует уже 25 м, а при частоте 150 МГц и того меньше — 12 м. Это вполне приемлемый подход для моделирования карстовых пустот и погребенных остатков фундаментов древних построек — храмов, дворцов. Необходимо отметить, что георадарный импульс — это пакет частот в довольно широких пределах, по-



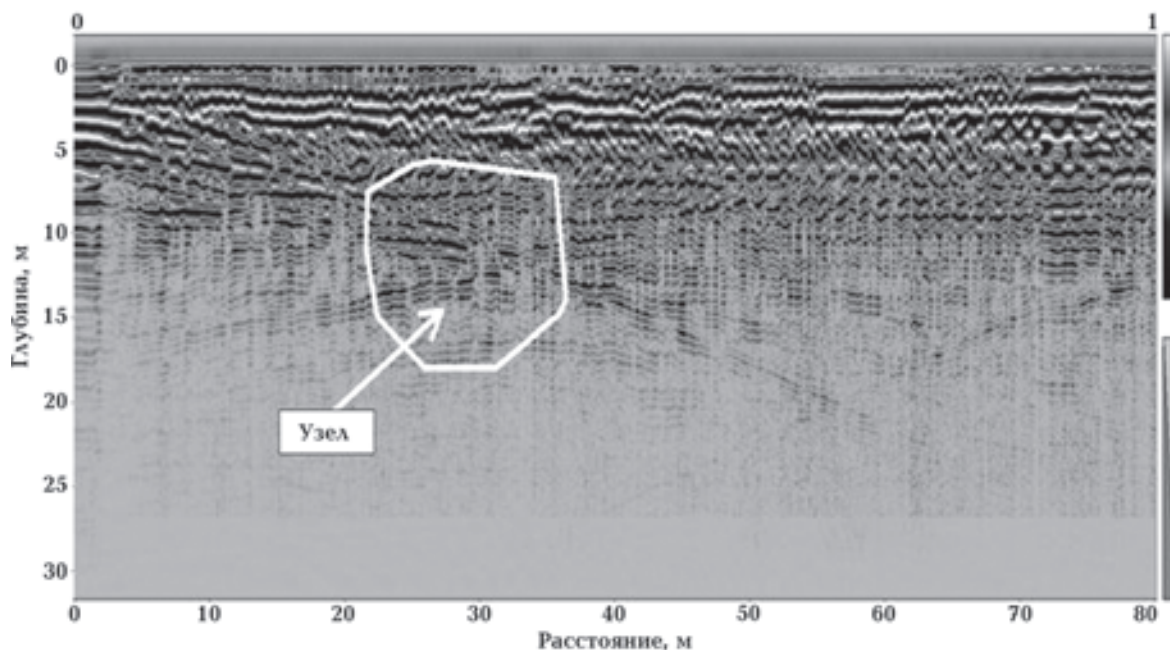


Рис. 6. Радарограмма для профиля длиной 80 м с приемно-передающей антенной центральной частотой 75 МГц на прилегающей к Кафедральному собору Светицховели территории. Стрелкой показан характерный для перекрытой полости, ограниченной погребенным фундаментом, радиобраз «лучевого пересечения».

скольку антенна, создающая георадарный импульс, сверхширокополосная. Это значит, что импульсом перекрываются линейные размеры исследуемого объекта в пределах приблизительно от 100 до 2 м фактически непрерывно. Пределы перекрытия линейных размеров исследуемого объекта зависят от частотных возможностей примененного георадара. В данном случае использовался георадар «Зонд-12е» с штатными антеннами и программным обеспечением Призм 2.5 [Призм 2.5, 2011].

Для иллюстрации сказанного приводится пример исследования модельной георадиолокационной структуры (типа перекрытая полость с гладкими вертикальными стенами), геометрия и схематический радиобраз которой представлены на рис. 2. Очевидно, для подобной структуры характерно появление на радарограмме лучевого пересечения или для краткости «узла» (в английской литературе — bow-tie, рис. 2).

В нашей физической модели объект представляет собой наполняемый водой бак размером примерно 1×1 м и глубиной 0,33 м, перекрытый базальтовой плитой (рис. 3).

Ниже приводятся радарограммы для модели полости без воды или при частичном заполнении ее водой (рис. 4, 5).

На рис. 4 представлена радарограмма модели для пустой полости; отчетливо видно характер-

ное для данного типа объекта «лучевое пересечение» (или узел) синфазных дифрагированных электромагнитных волн на глубине 33 см.

На рис. 5 представлены радарограмма для заполненных на 12 и 23 см водой полостей; отчетливо видно характерное для данного типа объекта «лучевое пересечение» синфазных дифрагированных электромагнитных волн примерно на той же глубине, что и для пустой полости.

Очевидно, при заполнении полости водой средняя диэлектрическая постоянная полости изменяется от таковой для воздуха ( $\epsilon=1$ ) до значений, более близких к воде ( $\epsilon=80$ ), чем и вызвано перемещение радиобраза «узла» ближе к поверхности. Другими словами, при заполнении водой реальный радиобраз объекта (полость вода/воздух) перемещается вверх, но сам радиобраз «узел» сохраняется.

Радиобразы, подобные картинкам «лучевого пересечения», полученным на лабораторной модели, наблюдаются на радарограмме территории, прилегающей к Кафедральному собору XI века Светицховели в Тбилиси (рис. 6). Радарограмма, представленная на рис. 6, получена в натуре для профиля длиной 80 м приемно-передающей антенной с центральной частотой 75 МГц. На ней образ bow-tie фиксируется на глубине порядка 1,5 м. По мнению археологов,

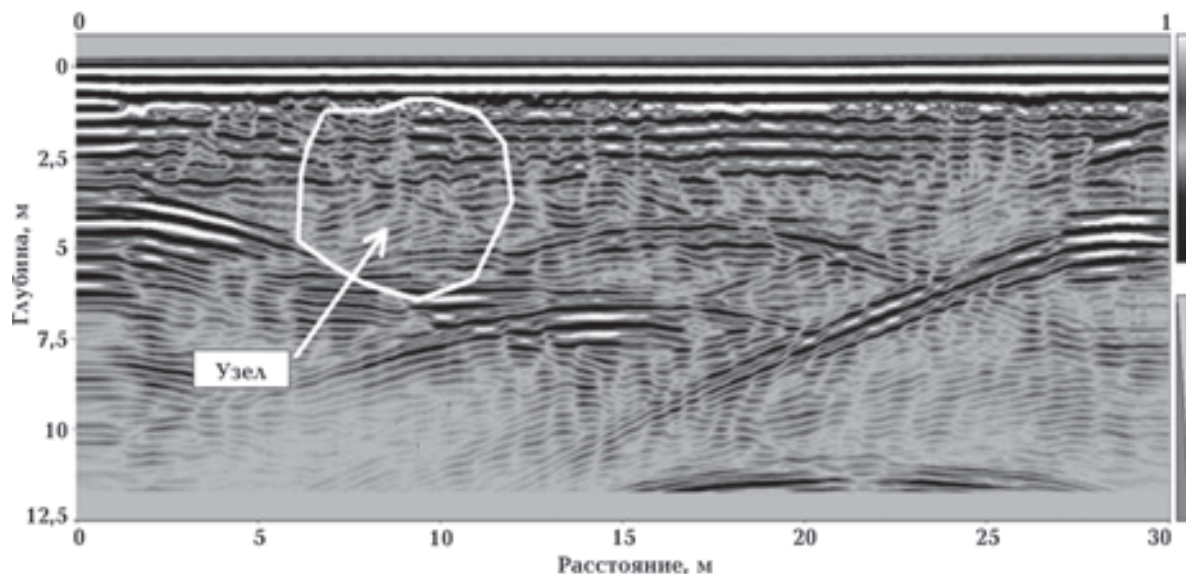


Рис. 7. Георадарный профиль в самом Кафедральном соборе Светицховели; стрелкой показано характерное для открытой полости «лучевое пересечение».

аномалия может быть связана с пустотой в погребенном фундаменте более древнего сооружения. Для оценки линейных размеров этого объекта используем соотношения подобия. Введя в правую часть основного соотношения подобия (3) известные заранее параметры модели и природы:  $f_m=2000$  МГц,  $\epsilon_m=1$ ,  $l_m=1$  м,  $f_n=75$  МГц и полагая среднюю диэлектрическую проницаемость среды в природе  $\epsilon_n=9$  (суглинки), получим оценку линейного размера объекта в природе  $l_n=9$  м.

Радарограмма, представленная на рис. 7, получена для профиля длиной 30 м на приемно-передающей антенне с центральной частотой

150 МГц внутри Кафедрального собора Светицховели. Здесь узел наблюдается на глубине порядка 3,5—4 м и может быть связан с наличием погребения.

**Заключение.** В настоящей статье показана возможность и указаны границы применимости условий подобия электромагнитных полей в георадиолокации для решения обратной задачи электродинамики с помощью модели (соответствующей прямой задаче электродинамики) с применением штатных антенн георадара «Зонд-12е» со своим программным обеспечением Призм 2,5 при наличии элементарной моделирующей установки.

### Список литературы

- Бердичевский М. Н., Мороз И. П., Кобзова В. М., Билинский А. И. Физическое моделирование в геоэлектрике. — Киев: Наук. думка, 1987. — 140 с.
- Бурсиан В. Р. Теория электромагнитных полей, применяемых в электроразведке. — Ленинград: Недра, 1972. — 368 с.
- Призм 2.5. Программное обеспечение для георадара Зонд-12е. — 2011.
- Czaja K. Application of modeling of electromagnetic field and GPR measurements in investigations of antique tenement // Geophys. Res. Abstr. — 2012. — 14.
- Ganiard L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting // Geophysics. — 1953. — 18. — P. 605—635.
- Gürel L., Oğuz U. Three-Dimensional electromagnetic modeling of various GPR problems // Geophys. Res. Abstr. — 2012. — 14.
- Neal A. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress // Earth-Sci. Rev. — 2004. — 66. — P. 261—330.
- Negi J. G., Gupta C. P. Models in applied geoelectromagnetics // Earth Sci. Rev. — 1968. — 4. — P. 219—241.
- Odilavadze D. T., Tatishvili O. V. Model Investigation of MT-field of the territory of Georgia. Ninth Work-

shop on Electromagnetic Induction in Earth and Moon. — Moscow, 1988.

Texas at Austin, 2004. — 251 p. — (repositories. Lib. Utxas. edu).

*Sena D'Anna A. R.* Modeling and imaging of ground-penetrating radar data. — Texas: The University of

*Sharma P. V.* Environmental and engineering geophysics. — Cambridge: Cambridge University Press, 1997.