ПОИСК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КОНСТРУКТИВНЫХ ПУСТОТ С ПОМОЩЬЮ ГЕОРАДАРНОЙ ТОМОГРАФИИ НА ПРИМЕРЕ ДВУХ КОЛОНН

М.С. Судакова[1,2], Е.Б. Терентьева[1], А.Ю. Калашников[1]

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, РОССИЯ

[2] Институт Криосферы Земли Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень, РОССИЯ

Аннотация: В статье приведены результаты исследования, целью которых является оценка возможности обнаружения и оконтуривания конструктивных пустот, размеры которых превышают длину волны для используемой частоты. Описываются два примера применения георадиолокационного томографического просвечивания: 1) квадратной бетонной колонны с гранитной облицовкой, полой внутри, и 2) цилиндрической гранитной колонны с конструктивной полостью круглой формы с железными стенками. Рассматриваются вопросы методики, структура получаемых данных, выделение полезных волн на фоне помех, анализируется результат томографического обращения, который сравнивается с результатом георадиолокации в традиционной модификации с совмещёнными источником и приемником. В результате проделанной работы было доказано, что задача поиска, оконтуривания и определения размеров пустот внутри строительных конструкций уверенно решается при помощи георадарной томографии. С высокой точностью было определено распределение скорости электромагнитных волн в твёрдой части колонн (бетоне и граните), которое может быть использовано для пересчёта в физические свойства, такие как влажность, пористость и пр. Был получен количественный результат, лишенный обычной неоднозначности, свойственной косвенным методам исследования, и является более качественным и достоверным по сравнению с результатами георадиолокационного зондирования с совмещенным источником и приёмником.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, электромагнитные методы исследования, прямая и обратная задачи, математическое моделирование, георадар, томография.

SEARCHING AND MEASUREMENT OF FUNCTIONAL VOIDS BY MEANS OF GPR TOMOGRAPHY BY THE EXAMPLE OF TWO COLUMNS

Marina S. Sudakova[1,2], Evgeniya B. Terentieva[1], Alexey Yu. Kalashnikov[1]

[1] Lomonosov Moscow State University, Moscow, RUSSIA

[2] Earth Cryosphere Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyuman, RUSSIA

Abstract: The present article focuses on GPR tomography method potential aimed at the search of functional voids and estimation of their sizes in engineering structures. The size of voids is assumed to be greater than the wavelength for usable frequency. Two examples of the GPR tomographic survey are examined: 1) a square concrete pillar with granite coating and a square void in the center, 2) cylindrical granite column with functional spherical void which has iron walls. The following issues are considered in the article: the method, the structure of the acquired data, the picking of wanted waves, the analysis of tomographic inversion result, compared with the result of commonly used single-fold antenna geometry GPR. As a result of the research performed it was demonstrated that GPR tomography represents a good solution for the problem of detection, delineation and characterization of voids inside engineering structures. The velocity of electromagnetic waves propagated within the solid part of the column (concrete and granite) was accurately measured. The measured velocity can be considered to the basis for physical properties estimation, for example humidity, voids ratio etc. The acquired quantitative results are characterized by high quality and are more reliable compared to the results of single-fold GPR survey.

Key words: Non-destructive testing, electromagnetic methods, forward and inverse problem solving, mathematical modelling, ground penetrating radar, tomography

ВВЕДЕНИЕ

Несущие свойства строительных конструкций зависят не только от свойств материала, но и от дефектов внутренней структуры: трещин, инородных включений и пустот. Существуют различные методы неразрушающего контроля в строительстве, в том числе георадиолокация. В большинстве случаев её использование направлено на выяснение структурной информации: оценку толщин конструктивных элементов [2, 9], обнаружение и выявление местоположения стальной арматуры или труб, перекрытых цементным слоем [17]. Кроме того, с помощью метода георадиолокации решаются задачи оценки присутствия влаги в бетоне [9, 10] и выявления крупных пустот [12].

Распространенной модификацией георадиолокации является модификация с совмещённым источником и приёмником. Кажущаяся простота такой методики оборачивается ошибками в определении строения среды и невозможностью получить её количественные характеристики. В частности, многие исследователи отмечают невозможность отличить пустоты с воздухом от других особенностей конфигурации [16, 17, 7], в том числе конструктивные пустоты с железными стенками.

Переход на количественный уровень и увеличение объема получаемой информации обеспечивает метод с разнесенными источником и приёмником. Использование метода томографии в георадиолокации помогает избавиться от ограничений метода с совмещенным источником и приемником и перейти на количественный уровень. Томография подразумевает значительное увеличение числа точек наблюдения, однако сложность и трудоемкость методики компенсируется качеством получаемой информации. В результате получают новую информацию: скорости распространения электромагнитных (ЭМ) волн в среде и оценку размеров конструктивных пустот.

По сравнению с сейсмической и георадарной скважинной томографией, когда источники и приёмники расположены в скважинах с двух сторон исследуемого массива, в обследовании инженерных конструкций есть большое преимущество: возможность расположения точек излучения по периметру или на большей его части. Это помогает увеличить количество лучей, проходящих через исследуемую среду, и, следовательно, точность применения метода.

Аналогичная георадиолокационной акустическая томография имеет ряд важных недостатков: во-первых, число точек физических наблюдений ограничено количеством сейсмических каналов, тогда как непрерывное перемещение приёмной или излучающей антенны георадара позволяет записать на порядок больше трасс, а во-вторых, скорость продольных волн в твёрдой части в несколько раз больше скорости в воздухе, что затрудняет правильное восстановление скорости сейсмических волн внутри полости и делает её идентификацию как "заполненную воздухом" затруднительной. Например, в работе [21], при скорости в твёрдой части около 3200м/с скорость в воздушной полости равнялась 2500м/с, что в 8 раз больше истинных 330м/с.

Несмотря на очевидные достоинства применения георадарной томографии, существуют и «подводные камни»: распространённая в сейсморазведке лучевая томография представляет собой расчёт скорости в среде из времен первых вступлений, в то время как в георадиолокации первыми приходят волны, полностью или часть пути, проходящие по воздуху.

Методически решать эту проблему, исключая из рассмотрения точки приема, в которые первыми приходят "воздушные" волны, как предлагается в [1], значит лишиться большинства точек наблюдения. Возможна попытка разделения "воздушных" и полезных волн (распространяющихся в среде), основанная на кинематических и динамических признаках (времени прихода, амплитуде и частоте).

В отличие от работ российских исследователей в мировой практике метод георадарной

томографии нашел более широкое применение как при решении инженерно-геологических задач, так и при обследовании зданий и сооружений, например [21]. При этом нигде не рассматриваются вопросы методики, анализа волновых картин, выделения прямых волн; проблема наличия железных стенок.

Ввиду того, что железо играет роль абсолютного отражателя [1], волны не будут распространяться в пустоте в случае наличия железных стенок. В результате, получаемая при расчете скорость будет иметь или аномально низкие значения, или не изменится по сравнению с начальной моделью. Тогда как в колонне с пустотой без железных стенок мы ожидаем встретить высокие значения скоростей.

В данной статье приведены результаты исследования, целью которых является оценка возможности обнаружения и оконтуривания пустот, размеры которых превышают длину волны для используемой частоты. Рассматриваются вопросы методики, структура получаемых данных, выделение полезных волн на фоне помех, анализируется результат томографического обращения, который сравнивается с результатом георадиолокации в модификации совмещённого источника и приемника. Описываются два примера применения георадиолокационного томографического просвечивания. Один пример – просвечивание гранитной колонны, с квадратным сечением и полой внутри. В качестве другого примера используется гранитная колонна с конструктивной полостью круглой формы с железными стенками.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТОМОГРАФИИ

По типам используемых данных томография делится на лучевую, дифракционную и полноволновую. Длины волн, используемые в лучевой томографии значительно меньше размеров изучаемых неоднородностей. В дифракционной томографии, напротив, используется длинноволновое приближение. В настоящее время для изучения трехмерных скоростных неоднородностей наибольшее распространение получили методы лучевой томографии. Лучевая томография – это обратная задача, при решении которой исходные данные представляются в виде функционалов по линиям (лучам) в пространстве. В лучевом приближении полагают, что энергия распространяется по лучевым трубкам некоторой толщины, зависящей от длины волны. Поэтому при большом количестве лучей лучевые трубки покрывают всю изучаемую область [24]. Среди основных уравнений лучевой томографии – уравнение эйконала, которое связывает время прихода волны в точку с распределением соответствующей скорости. Следствием его является интеграл, выражающий время распространения волны вдоль некоторого луча P от i-го источника к j-му приемнику:

$$T_{ij} = \int_{P_{ij}} \frac{dl}{V(r)} = \int_{P_{ij}} s \cdot dl, \qquad (1)$$

где $$s = \frac{1}{V(r)}$$

– параметр, обратный скорости и называемый медленность.

Это уравнение является основным уравнением лучевой томографии, на основе которого можно рассчитать поля времен и траектории сейсмических лучей. Решение же обратной задачи строится на поиске $V(r)$ по заданным распределениям T_{ij}. Эти уравнения справедливы для приближения $\omega \to \infty$. На практике это значит, что длина волны должна быть много меньше, чем размер неоднородности.

Поскольку траектория распространения лучей зависит от скорости, то зависимость времен прихода нелинейная. Для линеаризации этого выражения используется принцип Ферма. Подробности решения задачи томографии можно найти, например, в работе [15].

Предположим, что время пробега для стартовой, или фоновой модели равно T_0, то есть:

$$T_{i0} = \int_{P_0} \frac{dl}{V_0(r)}. \quad (2)$$

После чего рассчитывают интеграл по всему лучу P_0, рассчитанному для фоновой модели. Этот подход облегчает прослеживание лучей путем выбора слоистой фоновой модели для расчета пути P_0:

$$T_{ij} = \int_{P_0} \frac{dl}{V(r)} \quad (3)$$

При вычитании получают линеаризованное соотношение для задержки времен пробега δT:

$$\delta T = T - T_0 \approx \int_{P_0} \left(\frac{1}{V} - \frac{1}{V_0}\right) dl \approx - \int_{P_0} \frac{\delta V}{V^2} dl, \quad (4)$$

где δV(r) – скоростная аномалия модели.
В итоге устанавливается приближенное линейное соотношение между δV и отклонением между временами Tи T_0 при условии допущения о том, что траектория луча сохраняется той же. Задача сводится к восстановлению δV по известному временному отклонению.

ГЕОРАДИОЛОКАЦИЯ В ТОМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДИФИКАЦИИ

Георадарная томография является аналогом метода сейсмической томографии применительно к полю электромагнитных волн. Задача восстановления скоростей электромагнитных волн, проходящих через выделенный объём среды, по временам прихода при известных положениях источников и приёмников решается так же, как и в сейсмической томографии. Подробное описание метода можно найти как в иностранных, так и в отечественных работах [15, 23, 24]. Широко используемые томографические алгоритмы дают хорошие результаты при решении задачи построения изображений для большинства геофизических моделей. Однако ряд задач и являются трудными для решения и последующего анализа.

Наиболее сложной является задача выделения и определения размеров областей, в которых скорость распространения волн значительно отличается от скорости вмещающей среды в большую или меньшую сторону. Скоростная аномалия приводит к тому, что в процессе решения задачи разница скоростей распределяется по всей среде и граница между участками сред с разными значениями скоростей становится размытой [13]. Например, в работе [4] показано, как успешно решить задачу построения изображений высокоскоростных аномалий при скачке скорости более, чем на 20%, на основе использования т.н. «нерегулярных» алгоритмов, предлагаемых различными авторами [14, 6, 5].
Для томографического обращения георадарных данных используются те же математические алгоритмы, что и в сейсморазведке, поэтому все вышеуказанные выводы будут справедливы и здесь. Скорость распространения электромагнитной волны в воздухе равна 30 см/нс, тогда как в твердом веществе (граните, бетоне и т.д.) она составляет 10-17 см/нс. Таким образом, наблюдаемый скоростной контраст для случая контакта бетона с воздушной полостью много больше 30%, рассматриваемых в сейсморазведке. Между тем, в зарубежной литературе встречаются единичные примеры радарной томографии при поиске пустот [21]. При этом исследователям удается с достаточной степенью точности установить размеры пустот, с учётом того, что скорость в пределах пустот принималась равной 20 см/нс, что на 30% отличается от истинной.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ, МЕТОДИКА И АППАРАТУРА

В качестве целевого объекта нами были выбраны две колонны главного здания МГУ имени М.В. Ломоносова известной конфигурации. Фото колонн приведены на Рисунок 1.



Рисунок 1. Объекты исследования. Красной линией показаны проекция плоскости просвечивания.

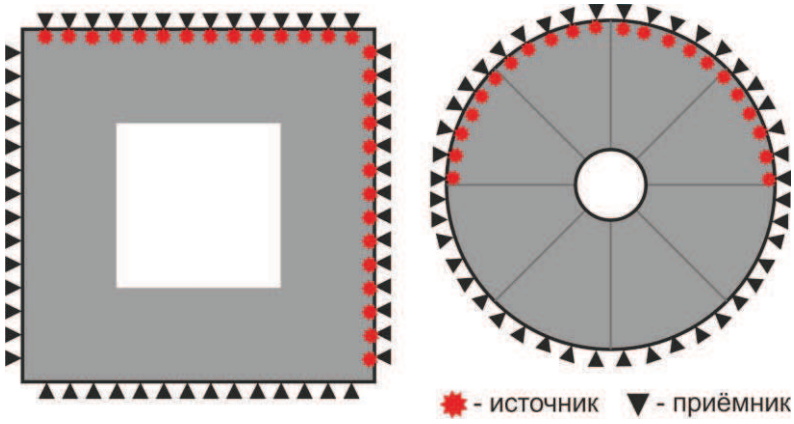


Рисунок 2. Расположение источников и приёмников на колоннах.

Согласно сведениям, представленным инженерной службой МГУ, обе колонны имеют симметричное строение. Под гранитной облицовкой квадратной колонны находятся несколько слоёв бетона различной прочности, возможно с металлическими армирующими конструкциями. Сечение колонны в горизонтальной плоскости – квадрат со сторонами 1,5 м, по центру которого квадратная пустота со сторонами по 70 см. Таким образом, толщина гранитно-бетонного слоя около 40 см со всех сторон. Радиус круглой колонны - около 70 см, она состоит из восьми гранитных блоков и имеет конструктивную полость по центру диаметром 30 см, с железными стенками (фонарный столб). Их схематичное строение в горизонтальной плоскости вместе с расположением источников и приёмников показано на Рисунок 2. Серым цветом показана гранитно-бетонная часть, белым - пустота, чёрным цветом - железные стенки.

Георадарное просвечивание, имеет большую плотность наблюдения, что дает возможность увеличить число лучей, проходящих через исследуемую среду.

На квадратной колонне пункты излучения располагались на двух соседних гранях; при исследованиях на круглой колонне по поло-

вине периметра колонны. Интервал между пунктами излучения составил 10 см. Особенности геометрии наблюдения объясняются принципом взаимности [8], благодаря чему источники могут располагаться только на половине периметра исследуемого объекта.

В случае аномалии изометричной формы наилучший способ оконтурить ее – обеспечить пересечение лучами этой аномалии со всех сторон [11]. В нашем случае приемная антенна перемещалась в режиме непрерывной съёмки по всему периметру колонн, что обеспечивало полное лучевое покрытие колонн во всех направлениях. На необработанных данных шаг между трассами составил около 1 мм.

Проблема выбора аппаратуры для томографических радарных исследований заключается в том, что немногие производители выпускают многоканальные радары с возможностью разделить источники и приемники. Для проведения томографического эксперимента нами использовался двухканальный георадар “Zond 12e” (RadarSystems, Рига, Латвия) с двумя антеннами с центральными частотами в воздухе 2000 МГц.

Взаимная ориентация излучающей (И) и приёмной (П) антенн на плоскости исследования показана на Рисунок 3. Такая ориентация была выбрана с точки зрения наибольшей площади пересечения диаграмм направленности антенн типа бабочка и направленности энергии излучения в среду. К тому же, взаимное расположение источников и приемников, демонстрируемое на Рисунок 3 обеспечивает получение радарограмм, которые мало подвержены влиянию «боковых» помех, лежащих вне линии профиля [1].

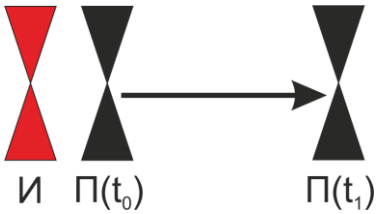


Рисунок 3. Взаимное расположение источника (И) и приёмника (П).

ИЗМЕРЕНИЯ С СОВМЕЩЕННЫМ ИСТОЧНИКОМ И ПРИЕМНИКОМ

Также было сделано георадарное просвечивание колонн по традиционной методике (с совмещёнными источником и приёмником) с той же аппаратурой. Шаг по профилю составил около 2 см, развертка - 30 нс.

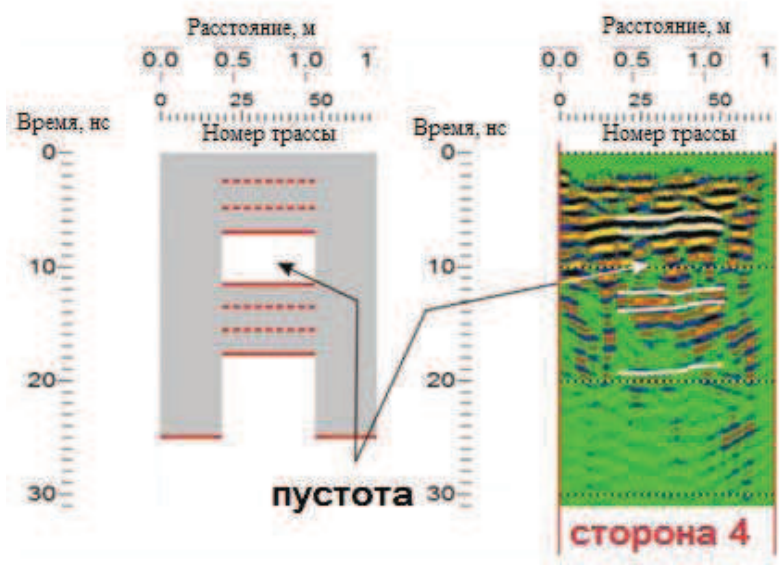
Измерения на квадратной колонне были произведены со всех сторон, данные, полученные на разных сторонах, аналогичны. Радарограмма, полученная на одной из сторон, приведена на Рисунок 4, а. Слева от неё приведена кинематическая модель (результат решения прямой задачи), которая соответствует строению колонны. На радарограмме видны четкие высокоамплитудные оси синфазности. Между тем, слоистая модель среды, которую можно построить на основании интерпретации радарограмм, существенно отличается от проектной конфигурации колонны. На приведённой радарограмме трудно обнаружить явные признаки наличия пустоты, такие как увеличение амплитуды, кратные отражения и т.д. Более того, точная оценка размера пустоты на основе геометрии с совмещенным источником и приемником невозможна [19].

На радарограмме, полученной при измерениях по периметру круглой колонны (Рисунок 4, б) на времени 7нс (соответствует глубине 42см при скорости 12см/нс) выделяется высокоамплитудная ось синфазности, которая свидетельствует о наличии границы с большим коэффициентом отражения внутри колонны (показана белым). Идентификация этой границы как верхней кромки полости также затруднительна. Кроме этого, на данных присутствуют наклонные отражения от границ гранитных блоков: их количество соответствует числу блоков (8).

АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Ранее уже отмечалось, что, поскольку скорость электромагнитных волн в воздухе –

а)



б)

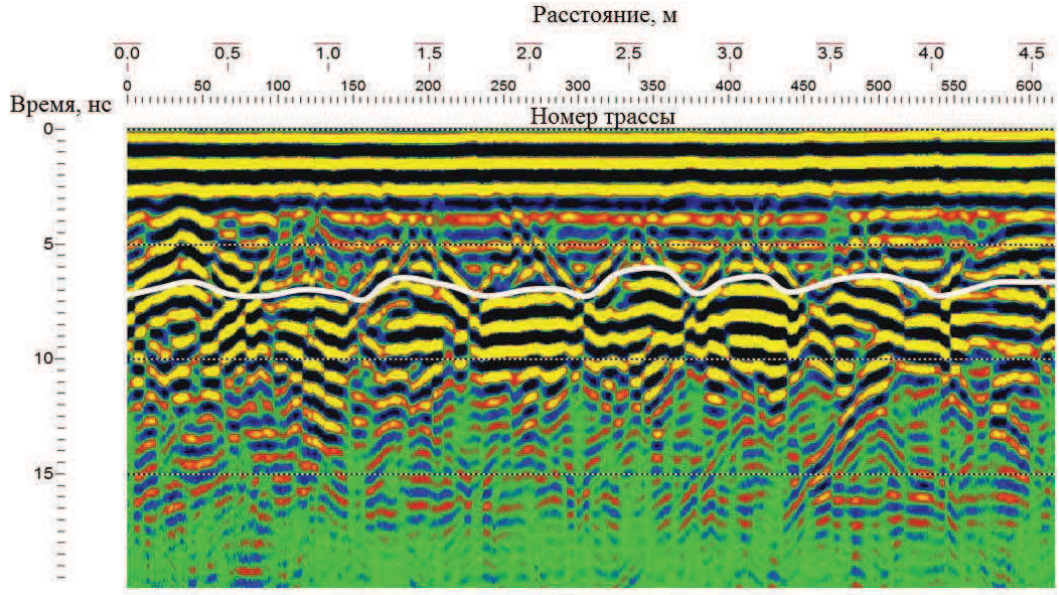


Рисунок 4. Радарограммы, полученные при работе с совмещенным источником и приёмником на квадратной (а) круглой (б) колоннах. Белым показаны выделяемые оси синфазности.

самая большая из существующих, при работе с разделёнными излучающей и принимающей георадарными антеннами первыми будут приходить волны, частично или полностью распространяющиеся по воздуху.

Полезными волнами являются те волны, которые распространяющиеся внутри среды – конструкции или геологического разреза – так называемые «прямые» волны, которые будут приходить во вторых и/или последующих вступлениях. Вследствие интерференции с воздушными волнами, выделение целевых волн может быть затруднительно или невозможно.

Для точного разделения различных волн был проведён анализ волновых картин, полученных с разными расположениями ис точников и приёмников, а также решалась прямая за-

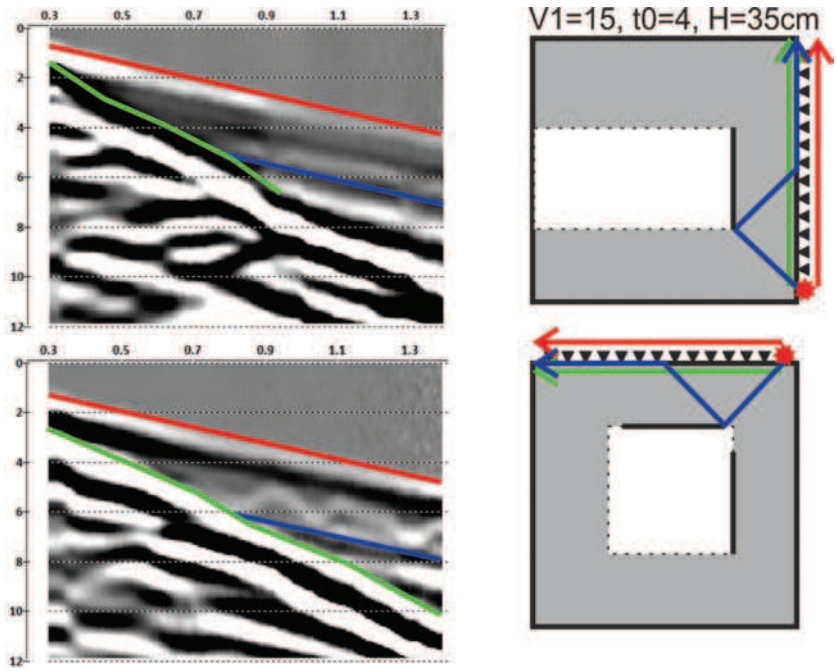


Рисунок 5. Экспериментальные волновые картины, полученные на стороне 1 квадратной колонны и теоретические пикировки, рассчитанные для разных типов волн.

дача в лучевом приближении. Для визуализации и выделения первых вступлений использовалась программа «RadexPro» компании «Деко-Геофизика».

Квадратная колонна

Волновые картины, соответствующие разным сторонам, анализировались отдельно. Избранные радарограммы представлены на Рисунок 5 - Рисунок 7. Справа от радарограмм на рисунках приведены схемы расположения источников и приёмников (показаны красными звездами и чёрными треугольниками соответственно) на колоннах с лучевыми траекториями волн, оси синфазности которых можно проследить.

На Рисунок 5. представлены радарограммы, полученные, когда источники приёмники располагались на одной стороне («сторона 1»), положение источника показано звездочкой.

Такая методика съёмки подобна методике работ с использованием преломлённых волн, широко применяемой в сейсморазведке [22]. Её применение в георадиолокации для исследования разреза подробно описано в [3]. Волновая картина, полученная нами, аналогична приведённой в статье [3]: в первых вступлениях приходит волна, распространяющаяся между источником и приёмником по воздуху со скоростью 30 см/нс (показана красным). Во вторых вступлениях на небольших удалениях приходит прямая волна, распространяющаяся по среде (показана зелёным) с кажущейся скоростью около 15 см/нс; а на больших удалениях - волна, годограф которой параллелен «воздушной» волне – её скорость 30 см/нс. Это волна, отразившаяся от границы внутри среды, вернувшаяся обратно к дневной поверхности и преломившаяся под критическим углом на границе среда/воздух. После этого она распространяется по этой границе со скоростью во второй среде, то есть в воздухе. Наличие данной волны является индикатором наличия внутри среды отражающей границы, глубину до которой можно вычислить по формуле:

$$h = \frac{t_0 V_1}{2cosi_{кр}}, \qquad (5)$$

где V_1 - скорость внутри колонны, определяемая по прямой волне, равна 15 см/нс, t_0 – 4 нс. Следовательно, глубина до отражающей границы внутри колонны, рассчитанная по формуле, равна порядка 35 см. При распо-

ложении источников и приёмников на смежной стороне, волновая картина для которой приведена на Рисунок 6, был получен аналогичный результат.

Глубина до границы, от которой получено отражение, соответствует глубине до пустоты с ошибкой около 10 %; типичной для метода t_0. Скорость прямой волны в колонне, равная 15 см/нс, соответствует скорости в бетоне и граните.

Кроме скорости, «воздушная» волна отличается от волны в среде по амплитуде, поэтому в рассмотренном случае их относительно легко разделить, хотя на верхней радарограмме на больших удалениях отделение прямой волны от преломлённой затруднительно вследствие интерференции.

На Рисунок 6 приведены радарограммы, полученные при положении приёмников на соседней от источников стороне («сторона 2») для крайних и среднего положений источников (порядковые номера источников 1, 7 и 14).

На данных, полученных при положении источников 1 и 7 на небольших удалениях, в первых вступлениях приходит волна, годограф которой представляет собой прямую линию, как и годограф преломлённой волны, однако её кажущаяся скорость равна 15 см/нс. Визуально энергетически она не отличается от прямой волны, приходящей в последующих вступлениях.

Для идентификации этой волны решалась прямая задача в случае лучевого приближения. Рассчитывались времена прихода трёх волн: прямой и двух преломлённых: первая преломлённая волна сначала проходит путь в воздухе, а потом под критическим углом входит в среду (показана красным), вторая преломлённая волна проходит часть пути в среде, а потом под критическим углом выходит из среды (показана синим цветом) и распространяется в воздухе.

Скорость в колонне по результатам анализа радарограмм на Рисунок 6 задавалась равной 15 см/нс, в воздухе 30 см/нс. Рассчитанные годографы преломлённых "воздушных" волн полностью совпали с прямыми осями синфазности на радарограммах, что позволило их идентифицировать и исключить из рассмотрения.

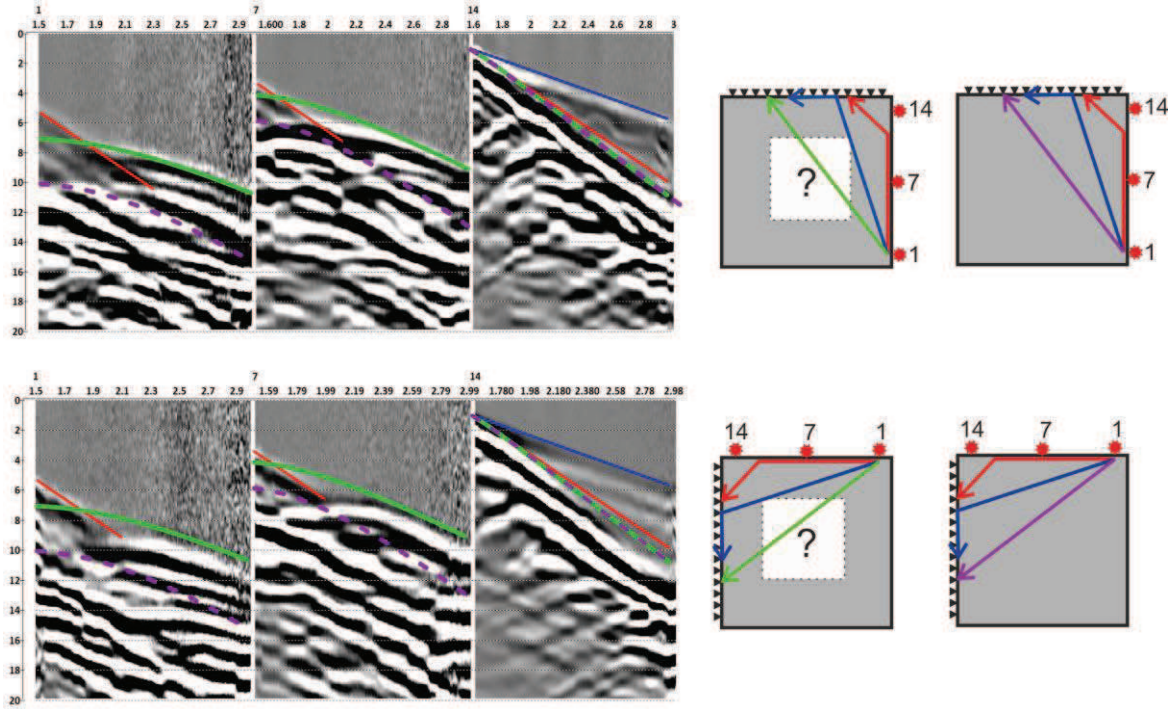


Рисунок 6. Экспериментальные волновые картины, полученные на стороне 2 квадратной

колонны и теоретические пикировки, рассчитанные для разных типов волн.

Времена прихода прямой волны, рассчитанные для скорости в колонне 15 см/нс, отличаются от времен прихода, наблюдаемых на радарограммах, в большую сторону, при этом форма наблюдённого годографа подобна форме рассчитанного (показан фиолетовым пунктиром на радарограммах). Следовательно, эффективная скорость распространения электромагнитных волн в среде больше 15см/нс, что указывает на присутствие высокоскоростной аномалии внутри колонны (пустоты). Времена вступления прямых волн на радарограммах от источников 1 и 7 соответствуют скорости 20см/нс (годографы показаны зелёным цветом), а от источника 14 – 15 см/нс, следовательно, наблюдаемые прямые волны от источника 14 не пересекают аномалию. Радарограммы, полученные для положения приёмников на противоположной от источников стороне («сторона 3») и положения источников 1, 7 и 14, показаны на Рисунок 7. Здесь также рассчитывались времена вступления преломлённых волн (показаны красным и синим) и времена вступления прямой волны для скорости 15 см/нс (показаны фиолетовым пунктиром) и 20 см/нс (показаны зелёным). Результаты аналогичны полученным для стороны 2: рассчитанные годографы преломлённых волн совпадают с наблюдёнными, средняя эффективная скорость прямых волн в среде около 20 см/нс.

Данные, полученные при положении приёмников на стороне 4 (нижней на Рисунок 5, Рисунок 6, Рисунок 7), по структуре повторяют данные для стороны 2, поэтому они не приведены.

Круглая колонна

Данные, полученные на круглой колонне, имеют более простую структуру (Рисунок 8), одинаковую для всех положений источника. В первых вступлениях приходят волны, распространяющиеся между источником и приёмником по воздуху со скоростью 30 см/нс (показаны синим и красным цветами). Прямая волна (показана зелёным цветом) значительно больше по амплитуде, приходит во вторых вступлениях со средней кажущейся скоростью 13 см/нс. Рассчитанный годограф прямой волны для этой скорости (зелёного цвета) наложен на радарограмму и почти полностью совпадает с осью синфазности прямой волны. Аналогичные волновые картины можно наблюдать в работе [18], в которой также описывается томографическое просвечивание на объекте цилиндрической формы – лизиметре с песком.

В центре оси синфазности прямой волны на всех радарограммах наблюдается "проседание" (показано зелёным пунктиром) – увеличение времени прихода волн за счёт увеличения длины луча, что указывает на наличие аномалии по центру колонны. Оранжевым цветом показаны отражения от границ гранитных блоков. В итоге, по результатам анализа данных и решения прямой задачи в лучевом приближении можно сделать следующие выводы:

1) Была определена природа осей синфазности, приходящих в первых вступлениях.
2) Были выделены прямые волны, являющимися целевыми для дальнейшего томографического обращения. Времена их вступления были определены и в дальнейшем использованы для расчёта распределения скоростей электромагнитных волн в колонне.
3) Была определена средняя скорость в твёрдой части колонн – 15 см/нс для квадратной колонны и 13 см/нс для круглой, что соответствует скорости в бетоне и граните.
4) Были определены следующие признаки наличия пустоты внутри колонн: увеличение средней эффективной скорости в квадратной колонне на 5 см/нс, что косвенно указывает на наличие воздуха внутри, и увеличение времени пробега для лучей, пересекающих центр круглой колонны.

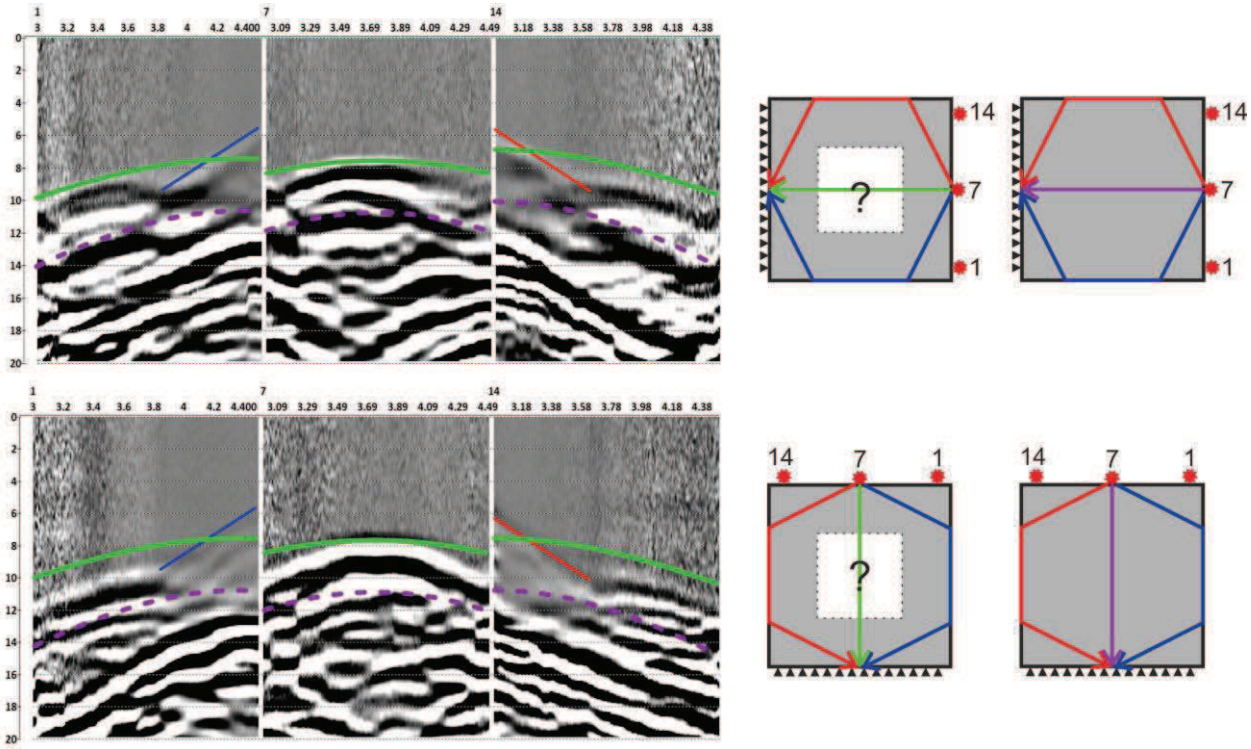


Рисунок 7. Экспериментальные волновые картины, полученные на стороне 3 квадратной колонны и теоретические пикировки, рассчитанные для разных типов волн.

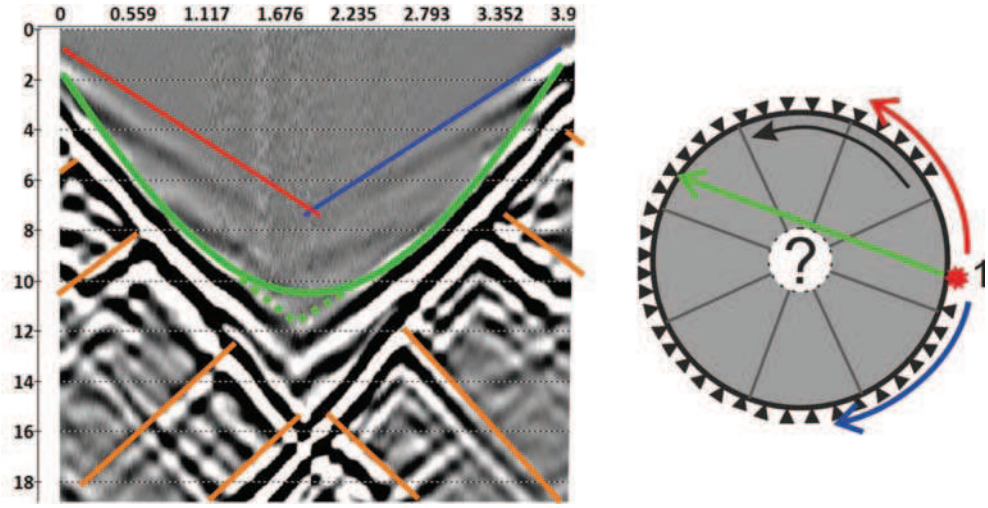


Рисунок 8. Экспериментальная волновая картина, полученная на круглой колонне в положении источника №1 и теоретические пикировки, рассчитанные для разных типов волн. Оранжевым цветом показаны оси синфазности волн, отражённых от границ гранитных блоков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ОБРАЩЕНИЯ

В томографическом обращении использовались времена прихода прямых волн. Расчёт вёлся в программе “GeoTomCG” (GeoTom, LLC). Основные принципы и алгоритмы расчетов изложены в статье [20]. Программа подразумевает расчет по регулярной сетке с использованием прямоугольных ячеек. Начальная модель задавалась с постоянной скоростью 17 см/нс в случае квадратной ко-

лонны и 12 см/нс в случае круглой колонны. Скорость рассчитывалась как среднее арифметическое из скоростей, полученных путём деления расстояния между источником и приёмником (длины прямого луча) на время первого вступления. Один из вопросов расчёта по регулярной сетке - это выбор размера ячейки, ведь разрешение томографических изображений пропорционально числу и размеру ячеек [11]. Кроме расстояния между точками приёма, минимальный размер ячейки определяется средней длиной волны сигнала, точностью пикирования первых вступлений, а также величиной средней скорости. Для обнаружения аномалии необходимо, чтобы кинематический эффект от неё превышал точность пикирования. Минимальный размер аномалии (Δl), дающий отклик в кинематике лучей, проходящих через нее, можно рассчитать согласно уравнению:

$$\Delta l = \frac{\Delta t}{\Delta v}(V_a * V_m), \qquad (6)$$

где V_a - скорость в аномальном объекте, V_m - средняя скорость в среде, $\Delta v = |V_a - V_m|$, Δt - погрешность пикировки первого вступления.

Размер ячейки, используемой для реконструкции аномалии, напрямую зависит от Δl и очевидно, что нет никакой необходимости использовать величину ячейки много меньше [11].

Точность пикировки равна примерно половине дискрета по времени - 0.29 нс, скорость в аномалии - 30 см/нс, за средние скорости были взяты 17 см/нс и 12 см/нс для квадратной и круглой колонн соответственно. В итоге, Δl для квадратной колонны равна около 11 см, для круглой - 6 см. Исходя из этих расчётов, было принято решение выбрать размер ячейки 5x5 см в обоих случаях. Скоростной разрез для квадратной колонны считался более чем по 2500 независимым лучам, для круглой - по 1500.

Всего было проведено 11 итераций для каждой из колонн: первая на прямых лучах, последующие на кривых. Алгоритм программы рассчитан таким образом, что для каждой следующей итерации уменьшается среднеквадратичная невязка между рассчитанными и наблюдёнными временами. Графики изменения среднеквадратичной невязки и суммы невязок представлены на Рисунок 9.

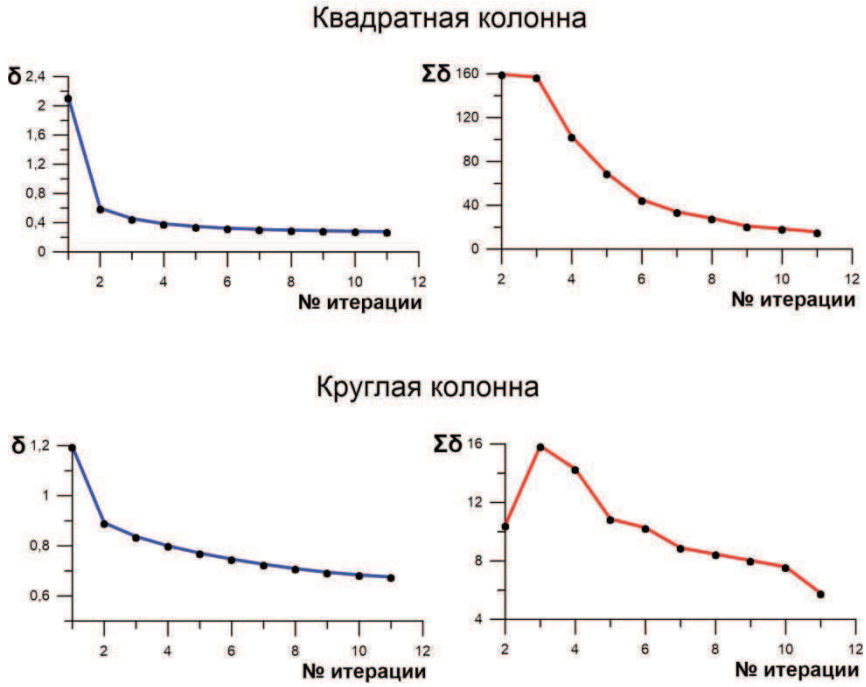


Рисунок 9. Зависимость среднеквадратичной погрешности расчёта (δ) и суммы всех погрешностей (Σδ) от номера итерации.

А) Б)

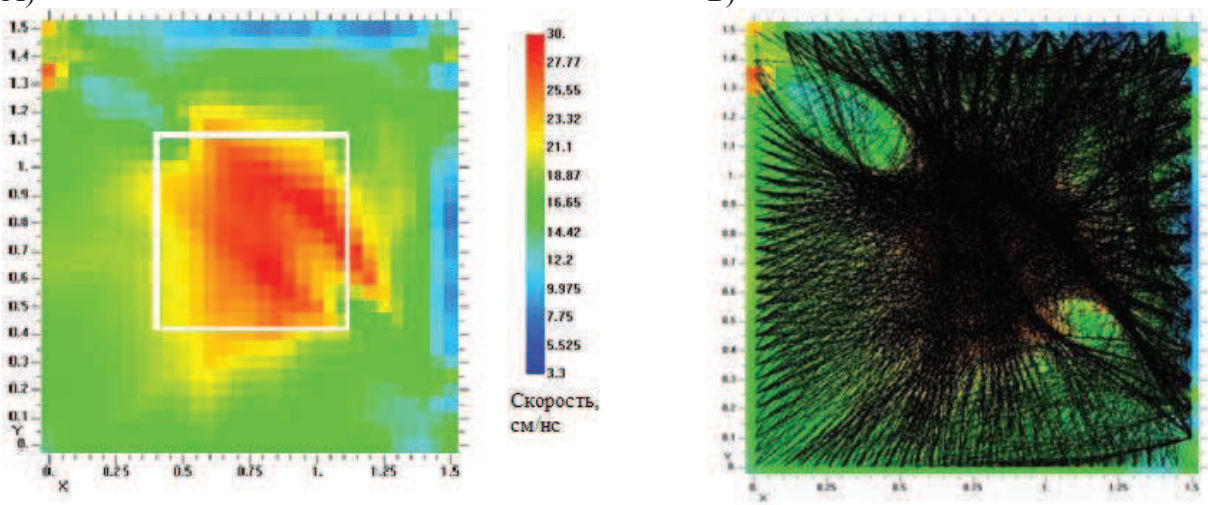


Рисунок 10. Результат томографического обращения (А) и траектории распространения лучей (Б) в квадратной колонне.

А) Б)

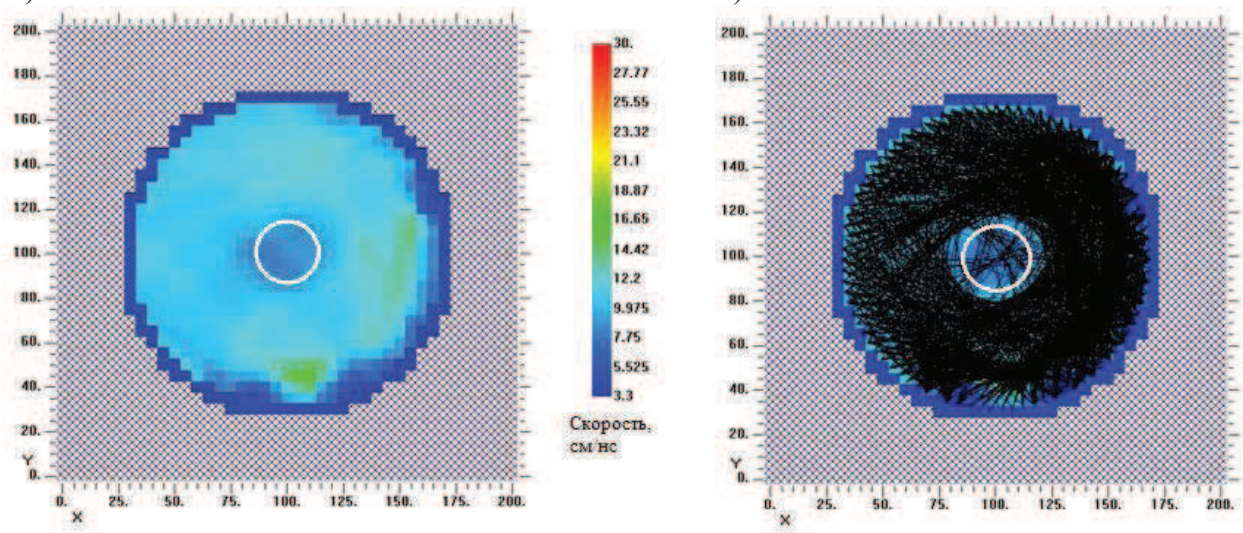


Рисунок 11. Результат томографического обращения (А) и траектории распространения лучей (Б) в круглой колонне.

Для квадратной колонны среднеквадратичная невязка в конце расчёта составляла 0.3 нс, сумма невязок - 15 нс, для круглой 0.7 нс и 5.8 нс, соответственно.

Полученные скоростные разрезы и траектории лучей показаны на Рисунок 10 и Рисунок 11. Белыми рамками показаны известные границы пустот. В центре скоростного разреза квадратной колонны отчётливо выделяется высокоскоростная аномалия со скоростями 25-30 см/нс, которая может быть проинтерпретирована как воздушная полость. Появление этой аномалии свидетельствует о том, что задача обнаружения воздушной полости решается уверенно. На границе твёрдая часть/воздух скорость 20 см/нс и внутри почти всей твёрдой части скорость равна полученной ранее - 15 см/нс.

Средняя скорость в пустоте с железными стенками (круглая колонна, Рисунок 11) отличается от скорости в твёрдой части ненамного (8 см/нс против 11 см/нс), однако

Таблица 1. Результаты томографического обращения.

	Квадратная колонна		Круглая колонна	
	Значение	Погрешность абсолютная (относительная)	Значение	Погрешность абсолютная (относительная)
Скорость в твёрдой части	15.5см/нс	0.5см/нс(3.3%)	11см/нс	2см/нс (15%)
Скорость в воздушной полости	25см/нс и выше	От 0 до 5см/нс (От 0 до 17%)	8см/нс	21см/нс (70%)
Размер воздушной полости	Площадь - 52см^2	3см / 6%	Радиус - 37см	7см (23%)

лучевое покрытие отличается принципиально: полость пересекает менее 10 % лучей, являющихся результатом ошибки алгоритма расчёта. По лучевому покрытию можно оконтурить область круглой формы с минимальным лучевым покрытием: радиус этой области равен около 37 см. Скорость в твёрдой части меняется от 9 до 16 см/нс, средняя скорость - 11 см/нс, что соответствует скорости в бетоне и на 2 см/нс меньше определённых ранее 13 см/нс.

Результаты георадиолокационной томографии с абсолютными и относительными ошибками определения приведены в таблице 1.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результат георадарной томографии принципиально отличается от результатов георадиолокационной съёмки с совмещенным источником и приёмником, которая не позволяет хорошо восстановить свойства изучаемой среды.

В случае квадратной колонны, все задачи кроме точного определения формы были решены успешно - ошибки в определении скорости в твёрдой части и площади пустоты не превышают 6%, максимальная ошибка в определении скорости в воздухе - 5 см/нс (17%).

В случае круглой колонны, как и ожидалось, скорость в пустоте не была определена верно из-за железных стенок, наличие которых увеличивает длину лучей, а, следовательно, уменьшает получаемую скорость. При этом по анализу лучевого покрытия была выделена аномалия, форма и положение которой точно соответствуют конструктивной пустоте, а радиус отличается в большую сторону на 7 см (23%). Скорость в граните отличается от определённой ранее на 2 см/нс (15%).

В результате расположения точек измерений по периметру колонн, были определены не только параметры конструктивных пустот, но и правильно рассчитана скорость в твёрдой части конструкции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы было доказано, что задача поиска, оконтуривания и определения размеров пустот внутри строительных конструкций хорошо решается при помощи георадарной томографии. Полости выделяются по скорости, соответствующей скорости распространения электромагнитных волн в воздухе - 25-30 см/нс, а полости с железными стенками - по крайне малому лучевому покрытию.

Несмотря на наличие высококонтрастной аномалии внутри строительных конструкций, применённая методика позволила с вы-

сокой точностью определить скорость в твёрдой части колонн (бетоне и граните), которая может быть использована для пересчёта в физические свойства, такие как влажность, пористость и пр.

Использование томографической методики требует увеличения числа точек зондирования, решения прямой задачи для избавления от неоднозначности в выделении полезных волн. Помимо стандартных программ обработки георадиолокационных данных требуется специальное программное обеспечение для расчёта распределения скоростей электромагнитных волн внутри конструкции. Однако, получаемые результаты - количественные и лишены обычной неоднозначности, свойственной косвенным методам исследования, поэтому являются более достоверными по сравнению с результатами георадиолокационного зондирования с совмещенным источником и приёмником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Annan A.P.** Ground penetrating radar workshop notes, Ontario, Sensors & Software Inc., 2001, 192 pages.
2. **Barrile V., Pucinotti R.** Application of radar technology to reinforced concrete structures: A case study. // NDT & E International, 38(7), 2005, pp. 596-604.
3. **Bohidar R.N., Hermancez J.F.** The GPR refraction method. // Geophysics, vol. 67, no. 5 (september-october 2002), pp. 1474–1485
4. **Chao-Ying Bai, Greenhalgh S.** 3-D Nonlinear Travel-time Tomography: Imaging High Contrast. // Pure and Applied Geophysics, 162, 2005, pp. 2029-2049.
5. **Fischer R., Lees J.M.** Shortest Path Ray Tracing with Sparse Graphs. // Geophysics, 58, 1994, pp. 987-996.
6. **Gruber T., Greenhalgh S.A.** Short Note: Precision Analysis of First-break times in Grid Models. // Geophysics, 63, 1998, pp. 1062-1065.
7. **Hamrouche R., Klysz G., Balayssac J.-P., Rhazi J., Ballivy G.** Numerical Simulations and Laboratory Tests to Explore the Potential of Ground- Penetrating Radar (GPR) in Detecting Unfilled Joints in Brick Masonry Structures. // International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration. 6:6, 2012, pp. 648-664.
8. **Helmholtz H.** Theorie der Luftschwingungen in Röhren mit offenen Enden. // In: Journal für die reine und angewandte Mathematik 57, Heft 1, 1860, pp. 1-72.
9. **Hugenschmidt J.** Concrete bridge inspection with a mobile GPR system. // Construction and Building Materials, 16, 2012, pp. 147-154.
10. **Hugenschmidt J., Loser R.** Detection of chlorides and moisture in concrete structures with Ground penetrating radar. // Materials and Structures. 41, 2008, pp. 785-792.
11. **Lehmann B.** Seismic traveltime tomography for engineering and exploration application. // EAGE publications, 2007, pp. 273.
12. **Maierhofer C., Leipold S.** Radar investigation of masonry structures. // NDT & E International, 34(2), 2001, pp. 139-147.
13. **Mathewson J.C., Evans D., Leone C., Leathard M., Dangerfield J., Tonning S.A.** Improved imaging and resolution of overburden heterogeneity by combining amplitude inversion and tomography. // SEG 2012 Annual Meeting, 5, 2012, Las Vegas, pp. 4271-4274.
14. **Moser T.J.** Shortest Path Calculation of Seismic Rays. // Geophys., 56, 1991, pp. 59-67.
15. **Nolet G.** A breviary of seismic tomography, imaging the Interior of the Earth and Sun. Cambridge, Cambridge University Press, 2008.

16. **Roberts R., Corcoran K., Arvanitis M., Schutz A.** Insulated Concrete form Void Detection Using Ground Penetrating Radar. // PIERS Proceedings, Marrakesh, MOROCCO, March 20-23, 2011.
17. **Santos-Assunçao S., Perez-Gracia V., Caselles O., Clapes J., Salinas V.** Assessment of Complex Masonry Structures with GPR Compared to Other Non-Destructive Testing Studies. // Remote Sensing. 6, 2014, pp. 8220-8237.
18. **Schmalholz J., Stoffregen H., Kemna A., Yaramanci U.** Imaging of water content distributions inside a lysimeter using GPR tomography. // Vadose zone journal, Vol. 3 No. 4, 2004, pp. 1106-1115.
19. **Starovoytov A.V., Romanova A.M., Kalashnikov A.Yu.** GPR study of depressed areas in the upper cross-section. // EAGE Near Surface. Manchester, UK.2011.
20. **Tweeton D.R., Jackson M.J., Roessler K.S.** BOMCRATR – A Curved Ray Tomographic Computer Program for Geophysical Applications. // USBM RI 9411, 39, 1992.
21. **Wenfrich A., Trela Ch., Krause M., Maierhofer Ch., Effner U., Wostmann J.** Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Traveltime Tomography. // In Tu.3.2.5 Bundesanstalt für Materialforschung und – prüfung (BAM), Berlin, Germany, 2006.

Судакова Мария Сергеевна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, кафедра сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; Россия, Институт Криосферы Земли Сибиирского отделения РАН, 119991, Москва. Ленинские горы, д. 1;
Тел.: +7(495)939-12-30;
E-mail: m.s.sudakova@yandex.ru

Терентьева Евгения Борисовна, кандидат физико-математических наук, старший преподователь, кафедра сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; Россия, 119991, Москва. Ленинские горы, д. 1; Тел.: +7(495)939-43-70; E-mail: genia_teren@mail.ru

Калашников Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник, кафедра сейсмометрии и геоакустики геологического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова;, Россия, 119991, Москва. Ленинские горы, д. 1; Тел.: +7(495)939-12-30; E-mail: x_kalash@mail.ru

Sudakova Maria Sergeevna, PhD, Research Fellow, Department of Seismometry and Geoacoustic, Geology faculty, Moscow State University M.V.Lomonosov, Earth Cryosphere Institute SB RAS, 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia; Phone +7(495)939-12-30;
E-mail: m.s.sudakova@yandex.ru

Terentieva Eugeniya Borisovna, PhD, Senior Professor, Department of Seismometry and Geoacoustic, Geology faculty, Moscow State University M.V. Lomonosov; 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia;
Phone +7(495)939-43-70; E-mail: genia_teren@mail.ru

Kalashnikov Alexey Yurievich, Junior Research Fellow, Department of Seismometry and Geoacoustic, Geology faculty, Moscow State University M.V. Lomonosov; 1, Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia;
Phone +7(495)939-12-30; E-mail: x_kalash@mail.ru