

Георадарное зондирование подповерхностной структуры грунта Национального заповедника «София-Киевская» на территории Кирилловской церкви

© *Е. А. Кожан, В. Г. Сугак, А. В. Сугак, 2010*

Институт радиофизики и электроники НАН Украины, Харьков, Украина
Поступила 8 мая 2009 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Розглянуто застосування георадарного зондування для визначення вологості та структури шарів ґрунту в околиці Кирилівської церкви, що є складовою Національного заповідника «Софія-Київська». Зондування здійснено із використанням сигналу с покроковою зміною частоти у діапазоні 130—270 МГц. Наведено результати визначення ступеня зволоження ґрунту, що одержані на основі застосування фазової структури сигналів. За аналізом ступеня зволоження шару лесової супесі, проведеним на основі георадарної інформації, зроблено висновки щодо можливих причин деформації будинку храму. Отримана інформація може бути використана для розробки захисних інженерних заходів.

Georadar sensing application has been considered for determination of humidity and soil layer structure in the vicinity of the Cyril's church being a part of the structure of the National preserve «Sofiya-Kievskaya». The probing was carried out with the use of Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) ground Penetrating Radar (GPR), operating in the frequency band of 130—270 MHz. The measurement outcomes of the determination of soil layer moistening degree obtained on the basis of the signal phase structure are resulted. The loess loamy sand moistening degree analysis obtained on the basis of georadar information, allowed to make a conclusion about the possible reason of the temple building deformations. Information obtained could be applied for elaboration of protecting engineering actions.

Введение. Кирилловская церковь является одним из немногих памятников истории и архитектуры г. Киева (рис. 1), сохранившихся до наших дней со времен домонгольского периода. Храм изучен сравнительно слабо, особенно с точки зрения инженерно-технического сооружения и воздействия на него негативных процессов техногенного характера, обусловленных, в частности, фильтрацией влаги в верхних слоях грунта площадки церкви вследствие различного рода утечек. Последние могут оказывать значительное влияние на деформацию здания храма. Наблюдения за деформированным состоянием Кирилловской церкви проводились сотрудниками Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций (г. Киев) в 2004—2005 гг. [Висновок..., 2001]. Анализ полученных данных показал, что здание церкви имеет значительное количество разломов, силовых (до 3 мм) и поверхностных трещин. Наибольшие деформации имеются в стене северного фасада храма.



Рис. 1 Юго-западный фасад Кирилловской церкви.

Для правильного анализа причин значительных деформаций храма необходимо комплексное исследование как состояния здания, так и структуры зоны аэрации в его окрестности, включая исследования степени замачивания слоев грунта под площадкой здания храма и вблизи него.

В настоящей статье рассматриваются результаты применения сравнительного нового метода — георадиолокационного зондирования структуры грунта с целью выявления степени и глубины увлажнения верхних слоев зоны аэрации под площадкой Кирилловской церкви.

Георадиолокационное зондирование проводилось с использованием георадара, разработанного в Институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины (г. Харьков) и методики подобных изысканий, разрабатываемой в Научно-техническом институте транскрипции, трансляции и репликации (г. Харьков) совместно с отделом охраны памятников и архитектурных сооружений Национального заповедника «София-Киевская». В георадаре использован зондирующий сигнал с пошаговым изменением несущей частоты (ПИНЧ) в диапазоне частот 130—270 МГц. Технические характеристики прибора представлены в таблице, а некоторые результаты его применения в инженерной геологии можно найти в работе [Букин и др., 2005].

Основными задачами зондирования подповерхностной структуры Кирилловской церкви были:

- определение в верхних слоях грунта подповерхностных зон, насыщенных влагой, связанной с техногенным воздействием (утечки из коммунальных сооружений);

- определение литологического строения зоны аэрации площадки;

- выявление отдельных локальных неоднородностей в подповерхностной структуре грунта как возле здания, так и внутри самой церкви.

Согласно выводам [Висновок..., 2001], основание площадки Кирилловской церкви неоднородное. В пределах разведанной глубины до 17,2 м выделено четыре геологических слоя. Под насыпными грунтами на отметках 1,5—4,3 м и 5,6—12,4 м от поверхности залегают лессовые просадочные супеси. Суммарная просадка грунта от собственного веса при замачивании равна 1,21 см. Мощность просадочной толщи достигает 9,6 м. Ниже залегает песок пылеватый мощностью 1,3 м и супесь буровато-серая с прослойками и линзами песка, вскрытая мощность которой составляет 4,8 м. Грунтовые воды на площадке до глубины 17,2 м во время проведения изысканий (январь 2001 г.) не встречены.

Методика проведения зондирований состояла в следующем. Были выбраны и привязаны к карте территории Кирилловской церкви трассы движения (профили) георадара (рис. 2) Зондирование осуществлялось дискретно с шагом 0,3 м (половина размера антенны). Как видно, профили движения георадара по территории площадки церкви образуют два контура. Первый контур, внешний, располагался по возможности дальше от корпуса церкви. Второй контур, наоборот, опоясывал церковь в непосредственной близости от ее стен.

При обработке результатов зондирования были использованы новые математические

Таблица. Технические характеристики георадара

Параметры	Значение
Излучаемая мощность	3 Вт
Диапазон рабочих частот	130—270 МГц
Максимальная глубина зондирования в типовых грунтах	20—30 м
Разрешающая способность по глубине (в зависимости от глубины зондирования и влажности грунта)	15—40 см
Разрешающая способность в горизонтальном направлении на глубине около 5 м при включении режима синтеза апертуры антенны	50 см
Подавление излучения и приема сигналов из верхней полусферы	более 40 дБ
Время накопления сигнала	минимальное — 64 мс максимальное — неограничено
Точность измерения объемной влажности слоев грунта	10—20 %
Потребляемая мощность	20 Вт



Рис.2. План площадки Кирилловской церкви.

алгоритмы, основанные на использовании фазовой структуры отраженных подповерхностными неоднородностями сигналов [Сугак В.Г., Сугак А.В., 2008]. Алгоритмы разработаны специально для данного типа георадара с целью решения обратной задачи — выделения информации о физических свойствах слоев грунта и отдельных неоднородных объектов как естественного, так и искусственного происхождения. Ниже кратко изложены основы алгоритма обработки сигналов с использованием их фазовой структуры.

Методы обработки сигналов, учитывающие их фазовую структуру. После применения преобразования Фурье к квадратурным составляющим сигналов на выходе фазового детектора в георадаре с ПИНЧ, необходимое для перехода в частотную область представления сигналов, в которой частота пропорциональна значениям глубины, получаем выражение для комплексной спектральной плотности:

$$\dot{S}(\Omega) = |\dot{S}(\Omega)| \exp(\varphi(\Omega)), \quad (1)$$

где $|\dot{S}(\Omega)|$ — модуль спектральной плотности, $\varphi(\Omega)$ — фазочастотный спектр отраженных сигналов.

В этом выражении фазочастотная составляющая спектра характеризует зависимость фазы спектральных компонент сигналов, отраженных от неоднородностей в подповерхностном пространстве, от частоты (которая в нашем случае пропорциональна глубине).

Если рассмотреть фазовый коэффициент распространения радиоволн в среде с потерями и применить разложение в ряд Маклорена выражения, описывающее зависимость этого коэффициента от электрических характеристик среды, то можно получить зависимость дополнительного фазового сдвига спектральных компонент, характеризующих амплитуду отраженного сигнала в каждом элементе разрешения зондирующего сигнала, от глубины [Сугак В. Г., Сугак А. В., 2008]:

$$\Delta\Phi(d_n) = \frac{1}{4} \frac{\sigma^2 \sqrt{\mu}}{4(f_0 + n\Delta f) \sqrt{\epsilon_a \epsilon_a}} d_n, \quad (2)$$

где d_n — дискретное значение глубины, σ — удельная проводимость среды, ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, ω — круговая частота, μ — магнитная проницаемость среды.

Видно, что фазовый коэффициент, являющийся множителем дискретного значения глубины, характеризуется практически линейно нарастающей зависимостью и определяется электрическими характеристиками среды.

Рассмотрим влияние зависимости электрических характеристик грунтов от литологического состава пород (процентное содержание глинистой и песчаной фракций в смеси) и влажности на фазовый коэффициент. Модель, описывающая указанные зависимости электрические характеристик пород грунта, подробно изложена в работе [Овчинкин и др., 2005], поэтому здесь она не приводится.

На рис.3 показаны кривые, характеризующие зависимость постоянного фазового коэффициента от объемной влажности. Каждая кривая соответствует определенному типу грунта, который характеризуется процентным содержанием песчаной и глинистой фракций. Видно, что величина фазового коэффициента существенно зависит от объемной влажности и литологического содержания пород грунта.

Если структура грунта однородна по глубине, то фазочастотный спектр будет характеризоваться линейным нарастанием фазы по глубине. Так как при вычислении фазочастотного спектра используется стандартные

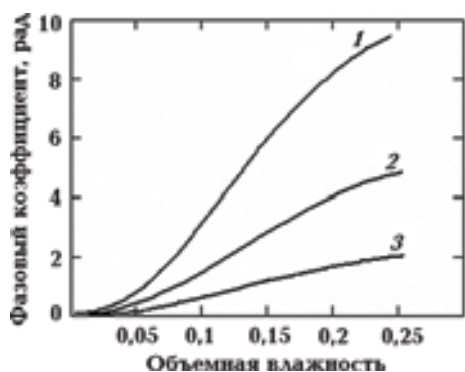


Рис.3. Зависимость фазового коэффициента от влажности: 1 — песок 30%, глина — 70%, 2 — песок 50%, глина — 50%, 3 — песок 70%, глина — 30%.

функции, то линейное нарастание фазы будет только в диапазоне, например, от 0 до $+2\pi$ с последующим скачком снова в 0. Таким образом, в рассматриваемом случае получаем примерно следующий результат, показанный на рис. 4 в виде кривой 2.

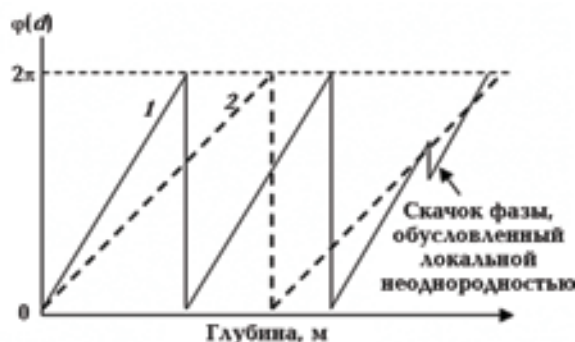


Рис.4. Фазочастотный спектр сигнала, прошедшего либо однородную среду (1), либо среду, в которой находится неоднородность (2).

Скорость нарастания фазового сдвига определяется электрическими характеристиками среды или скоростью распространения радиоволн в среде. Например, кривая 1 на рис. 4 соответствует среде, в которой влажность выше, а скорость распространения радиоволн меньше, чем для среды, которой соответствует кривая 2. При наличии локальной неоднородности в подповерхностном пространстве будет наблюдаться скачок фазы на определенной глубине (см. рис. 4). При этом достижение кривой максимального значения, равного $+2\pi$, уже будет на другой глубине, т. е. будет наблюдаться смещение максимального значения фазы на некоторую величину, которая зависит от величины скачка фазы.

При наличии неоднородности другого характера (речь идет о том, является она «оптически» более плотной или менее плотной по сравнению с окружающей средой) скачок фазы будет иметь противоположный знак и соответственно смещение максимума произойдет в другую сторону. Таким образом, по расстоянию между максимальными значениями фазового сдвига и их смещению в фазочастотном спектре отраженных сигналов, можно судить о физических свойствах самой среды и локальных неоднородностях.

Для решения обратной задачи — восстановления объемной влажности слоев грунта, применялся метод моделирования, позволяющий при известных характеристиках породы грунта определить такую объемную влажность, при которой будет получаться результат, совпадающий с результатом георадиолокационного зондирования. При моделировании используются радиофизические модели зависимости заданной литологической структуры грунта от значения объемной влажности и модели, описывающие процессы распространения и отражения радиоволн от неоднородностей подповерхностной структуры грунта [Овчинкин и др., 2005]. Отметим, что, как всякая обратная задача, восстановление объемной влажности слоев грунта по результатам зондирования является некорректной математической задачей, требующей использования большого количества дополнительной априорной информации, в частности информации о литологическом составе грунта, его минерализации и т. п. для получения требуемой точности решения. В данном случае точность определения объемной влажности при известном типе грунта составляет примерно 10—15%.

Основные результаты георадиолокационного зондирования грунта на территории Кирилловской церкви. Рассмотрим основные результаты зондирования. На рис. 5, а представлено обычное радиояркостное изображение сечения грунта вдоль профиля движения георадара Пр_1 (см. рис. 2), в котором степень затемнения отдельных зон пропорциональна амплитуде отраженных подповерхностными неоднородностями сигналов. По оси ординат отложена глубина в метрах, а по оси абсцисс — расстояние в метрах от начала профиля. Границы слоев разного литологического состава различаются более темными или светлыми оттенками, в зависимости от условий отражения, размытыми вследствие влияния разных факторов кривыми. Напри-

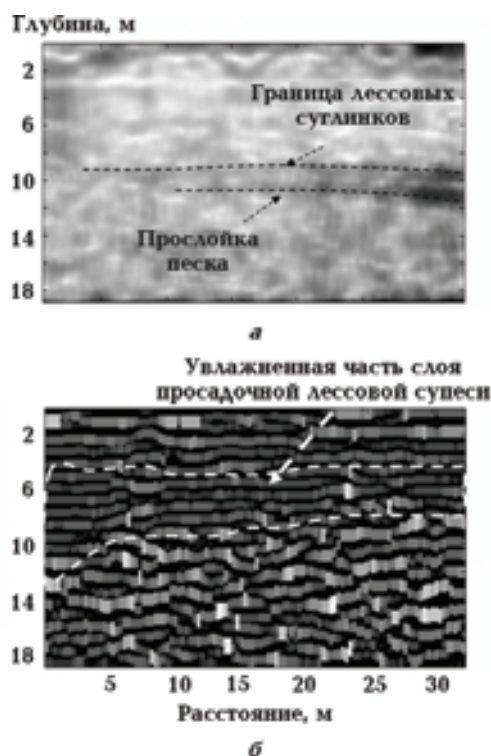


Рис. 5. Изображения радиолокационного сечения грунта по профилю Пр_1.

мер, при прохождении слоев грунта сигнал претерпевает искажения, обусловленные разным затуханием вследствие горизонтальной неоднородности грунта. Кроме того, на амплитуду сигнала, отраженного от неоднородности, залегающей на большей глубине, влияют коэффициенты отражения и прохождения сигнала неоднородностей, расположенных ближе к поверхности и пр.

В частности, на рисунке видна нижняя граница лессовых суглинков и прослойка песка (отмечены пунктирными линиями). Указанная граница отчетливо видна только во второй части профиля, в первой части она размывта и просматривается слабо. Причина этого будет изложена ниже.

На рис. 5, б представлено изображение фазовой структуры сигналов по глубине вдоль этого же профиля. Интерпретация этого рисунка значительно сложнее, чем верхнего. Изложим кратко метод использования фазовой структуры сигналов для выделения информации о физических свойствах слоев грунта и отдельных неоднородностей. Темными кривыми показаны так называемые изолинии фазовой структуры сигналов, которые соответствуют равным значениям фазы отражен-

ного сигнала (в нашем случае $+2\pi n$). Согласно теории распространения радиоволн в слоях грунта применительно к данному радиофизическому методу зондирования, расстояние между соседними изолиниями обратно пропорционально степени увлажнения грунта, т.е. объемной влажности. Объемная влажность является доминирующим фактором, определяющим ширину промежутка между соседними изолиниями. Кроме этого, искривление изолинии вверх или вниз также связано с влажностью, хотя интерпретация этого факта более сложное. При построении рисунка использован прием, когда промежуточная область между соседними изолиниями окрашивается в темный свет, интенсивность которого обратно пропорциональна расстоянию между этими линиями. Таким образом, степень затемнения указанных областей прямо пропорциональна влажности.

Используя радиофизические модели зависимостей электрических характеристик грунтов от литологического состава и влажности, а также электродинамические модели распространения радиоволн в зоне аэрации, можно решать обратную задачу, т.е. восстанавливать влажность слоев грунта по данным радиолокационного зондирования. Так как описанная методика весьма сложна и доступна достаточно узкому кругу специалистов в области радиофизики, останавливаться на ней более подробно не будем. Для качественной интерпретации результатов зондирования изложенного выше достаточно.

Таким образом, анализируя нижний рисунок можно сделать следующие выводы. В структуре слоев грунта вдоль указанного профиля можно выделить три слоя с разными значениями объемной влажности:

- верхний слой от поверхности до глубины примерно 3 м увлажнен слабо;
- слой, расположенный на глубине от 3 до 10 м в начале профиля и до 7 м в конце, характеризуется существенно большей объемной влажностью, которая в отдельных зонах может достигать значений 0,35—0,4%;
- слой, расположенный ниже слоя 2, характеризуется существенно меньшей объемной влажностью, но зато большей горизонтальной неоднородностью. Здесь наблюдаются многочисленные прослойки грунта с отличной плотностью или объемной влажностью. Необходимо отметить, что изменение плотности грунта

автоматически сопровождается изменением его объемной влажности, что определяется процессами фильтрации влаги в слоях зоны аэрации;

- уменьшение контраста линии границ между лессовым суглинком и прослойкой песка на данном изображении ближе к началу профиля объясняется затуханием радиоволн, сильно возрастающим с ростом влажности и толщины слоя.

Анализ радиолокационных изображений сечений грунта по всем профилям движения георадара с учетом их фазовой структуры позволяет сделать общий вывод о том, что степень замачивания грунта возрастает в юго-западной части территории площадки. Это может быть объяснено наличием здесь служебных помещений и примыканием с этой стороны зданий больничного комплекса. В этой части глубина увлажненного слоя достигает 10 м, в то время как противоположная часть территории площадки увлажнена только до глубины 5—6 м. Сказанное иллюстрирует рис. 6, на котором представлены радиояркое изображение сечения грунта по профилю 2 (см. рис. 2) и изображение фазовой структуры сигналов. Видно, что увлажненная зона

слоя лессовой супеси в этой части площадки существенно меньше. Особенностью этих изображений является также то, что хорошо прослеживается зона пересечения трассы движения георадара с подземным тоннелем, отмеченная на рис. 2.

На рис. 6, б видно, что глубже подземного тоннеля, который по априорной информации был забутован бетоном, наблюдается зона повышенной влажности, распространяющаяся на глубину до 10 м. Одной из причин этого может быть тот факт, что бетон, будучи твердым, цельным образованием, не соприкасается полностью со стенками тоннеля в отдельных местах. Это способствует накоплению влаги под бетоном и постепенному увлажнению грунта под ним.

Рассмотрим результаты зондирования по профилям, расположенным в самом храме (см. рис. 2). Вдоль профиля Пр_8, который пересекал подземный забутованный тоннель, его следов не выявлено. Однако после применения математического алгоритма синтеза апертуры антенны, суть которого заключается в существенном повышении разрешающей способности георадара в горизонтальном направлении, был выявлен небольшой объект на глубине около 1,7 м (рис. 7).

Вдоль профиля Пр_9, который располагался в юго-восточной части храма (см. рис. 2) с помощью изображения фазовой структуры грунта обнаружена подземная полость (рис. 8). Следует отметить, что пространственное расположение полости по нашим данным немного смещено относительно отметки на плане (см. рис. 2), что может быть связано с неточностью привязки профиля движения георадара к плану церкви.

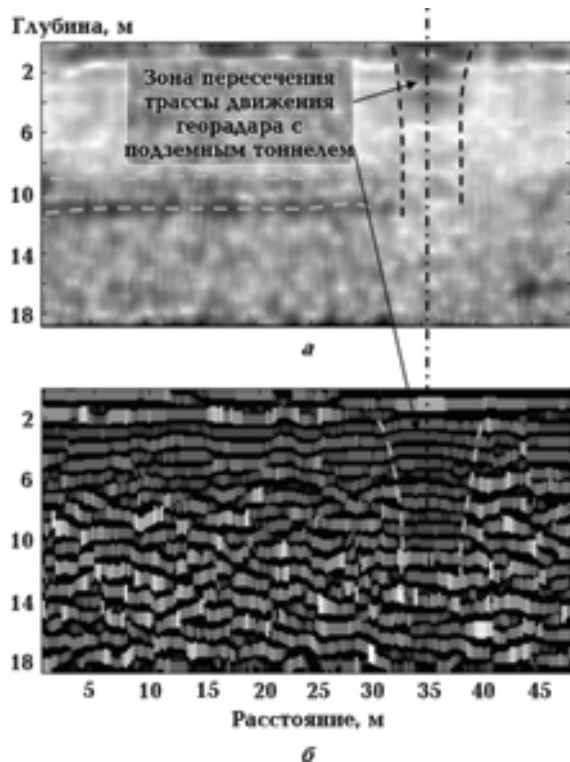


Рис. 6. Изображения радиолокационного сечения грунта по профилю Пр_2.

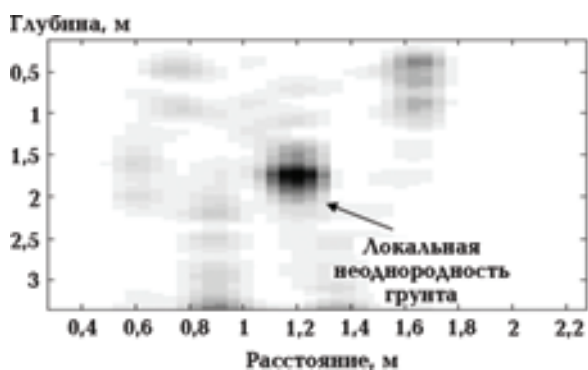


Рис. 7. Изображение сечения грунта по профилю Пр_8 после синтеза апертуры антенны.

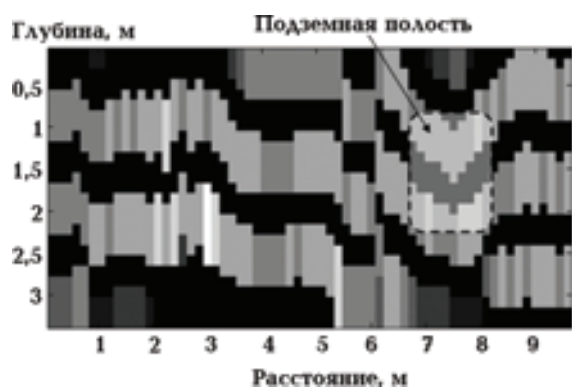


Рис. 8. Изображение фазовой структуры сигналов по профилю Пр_9 с отметкой подземной полости.

Выводы. Таким образом, полученные результаты георадиолокационного зондирования грунта на площадке Национального заповедника «София-Киевская» на территории Кирилловской церкви позволяют сделать следующие выводы.

1. Зондирование позволяет более детально исследовать литологическое строение грунта в окрестности храма, что важно для понима-

Список литературы

Висновок про інженерно-геологічні вишукування для проекту благоустрою території музею «Кирилівська церква» по вул. О. Телеги, 12 у м. Києві. — Київ: Вид. Держ. наук.-дослід. та проектно-вишуківального ін-ту «НДІпроекреконструкція», 2001. — 12 с.

Букин А. В., Овчинкин О. А., Пегенко Ю. А., Сугак В. Г., Силаев Ю. С. Применение специализированного георадиолокатора в задачах инженерной геологии, гидрогеологии и экологии // Наука та інновації. — 2005. — 1, № 2. — С. 32—43.

Сугак В. Г., Сугак А. В. Применение фазовой струк-

туры сигналов при подповерхностном зондировании для обнаружения и оценки физических свойств объектов и неоднородностей // Матер. 3-го Междунар. радиоэлектрон. форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Харьков: Изд. АНПРЭ, ХНУРЭ. — 2008. — С. 192—195.

2. На основании данных зондирования получена информация о степени замачивания просадочной лессовой супеси на всей территории площадки храма. Эти данные показали, что на юго-западной части площадки, прилегающей к служебным помещениям и зданиям больничного комплекса, лессовая супесь увлажнена до глубины около 10 м, в то время как ее противоположная часть (северо-восточная) — только до 5—6 м. Такое положение может быть следствием постепенного увлажнения верхних слоев грунта разного рода утечками из коммунальных труб, канализаций и пр. Вследствие указанного перепада глубины замачивания просадочных лессовых супесей возможна разная усадка фундамента храма на юго-западной и северо-восточной сторонах храма, что может приводить к деформации здания и трещинам.

3. Георадарное зондирование позволяет детально исследовать пространственное расположение подземных проходов и туннелей, что важно для более точной оценки их влияния на деформации церкви.

туры сигналов при подповерхностном зондировании для обнаружения и оценки физических свойств объектов и неоднородностей // Матер. 3-го Междунар. радиоэлектрон. форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». — Харьков: Изд. АНПРЭ, ХНУРЭ. — 2008. — С. 192—195.

Овчинкин О. А., Сугак В. Г., Сугак А. В. Интерпретация результатов георадиолокационного подповерхностного зондирования в условиях отсутствия априорных данных // Сб. научн. тр. ИРЭ НАН Украины. — 2005. — 11, № 1. — С. 78—86.