

Результаты георадарного обследования Ильинской церкви — усыпальницы Богдана Хмельницкого в Субботове

К. М. Бондарь¹, Р. В. Хоменко¹, А. П. Чернов¹, Н. В. Кукса², 2020

¹ Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

² Национальный историко-культурный заповедник «Чигирин»,

Черкасская обл., Украина

Поступила 12 марта 2020 г.

Археолого-геофизические исследования в Ильинской церкви в Субботове (Черкасская обл., Украина) проведены в связи с критическим пересмотром исторического мифа, существующего вокруг этого памятника, известного в качестве усыпальницы Богдана Хмельницкого, Гетмана Войска Запорожского и основателя Украинской державы. Целью работ являлся поиск скрытых конструкций в стенах и под полом церкви. В ходе исследований была проведена георадарная съемка, которой предшествовал тщательный анализ исторических и археологических источников, а затем геофизические аномалии были заверены бурением. В рамках проверки правильности интерпретации геофизической информации было выполнено численное моделирование георадарных данных. Измерения были выполнены с помощью георадаров серии VIY-3 с рабочими частотами 300 и 500 МГц по полу нефа и по стенам юго-западного угла церкви. В центральной части церкви на глубинах 2,4 и 4,0 м идентифицированы аномалии от свода и пола подземного сооружения, вытянутого вдоль оси восток-запад и, предположительно, почти полностью засыпанного грунтом. Бурение аномалии подтвердило наличие зоны разуплотнения, которая соответствует засыпке подземелья. Синтетические радарограммы, рассчитанные с помощью программы SrgMax с использованием геометрических параметров объекта, полученных в результате интерпретации георадарных данных и физических свойств грунтов, измеренных независимыми методами, соответствуют реально наблюдаемым. В стенах юго-западного угла значительных пустот георадарным методом не выявлено. Учитывая несостоятельность летописной версии о разорении могилы Б. Хмельницкого польско-шляхетскими войсками в 1664 г., сооружение может являться его склепом-усыпальницей, сведения о котором присутствуют в письменных исторических источниках.

Ключевые слова: георадар, Ильинская церковь, подземное сооружение, Богдан Хмельницкий, диэлектрическая проницаемость, суглинок

Вступление. Традиционный подход к сохранению знаковых объектов историко-культурного наследия как правило препятствует их всестороннему изучению. Использование общепринятых для археологии методов предполагает полное или частичное разрушение объектов в результате раскопок, что противоречит принципу их сохранения. Компромисс между полноценным изучением памятников и их сохранением возможен при условии применения неразрушающих геофизических методов.

Именно такая ситуация сложилась вокруг Ильинской церкви в Субботове (Черкасская обл., Украина), известной в качестве усыпальницы Богдана Хмельницкого (1595—1657), Гетмана Войска Запорожского и основателя Украинской державы.

Необходимость применения геофизики возникла в связи с проблемой восстановления исторической правды и критического пересмотра мифа относительно судьбы захоронения Гетмана.

Целью работ являлся поиск возможных скрытых конструкций в церкви.

Объект и историческая подоплека исследования. Ильинская церковь принадлежит к наиболее знаменитым архитектурным памятникам Украины (рис. 1). Она была построена на средства Б. Хмельницкого в 1651—1656 гг. [Кукса, 2002a]. Церковь представляет собой оборонное сооружение с мощными стенами толщиной до 1,7 м и бойницами. Западная стена дополнительно усилена колоннами с северной и южной сторон и в этих местах имеет толщину до 3,6 м. В северной части западной стены устроена лестница на хоры, а южная часть вместе с пристроенной колонной считается монолитной (рис. 2). Однако народная память сохранила легенду о существовании здесь входного тоннеля в подземелья церкви [Кукса, 2002 б].

Согласно летописным источникам, в августе 1657 г. здесь был похоронен Богдан Хмельницкий [Літопис Самовидця, 1971; Величко, 1991; Літопис ..., 1992].

В летописи гадяцкого полковника Григория Грабянки и «Черниговской летописи» XVIII ст. [Черниговская..., 1890; Літопис ..., 1992] содержится упоминание о том, что в 1664 г., когда польско-шляхетские войска захватили Чигирин, по приказу гетмана польного коронного Речи Посполитой Стефана Чарнецкого тела Богдана и его сына Тимоша были извлечены из могил и выброшены из гробов.

Многие историки не считают эту версию достоверной [например С. Крип'якевич, 1990; Кукса, 2006; Смолий, Степанков, 2009; Gawroński, 1903], тем не менее она оставалась доминирующей в советской, а позднее в украинской, историографии. Подтверждением этой версии считаются результаты раскопок П. Горишнего, когда в 1971 г. под южной стеной церкви, ближе к апсиде, была найдена пустая яма, интерпретированная автором раскопок как погребальная [Горішній, 1971]. В фундаменте рядом обнаружены два пролома, в одном из которых найден фрагмент человеческого ребра и обрывок шелковой ткани. По мнению автора раскопок, грабители проникли в могилу через проломы и вытащили гроб.

Методология исследования включала три этапа работ. На первом этапе был проведен сбор и анализ априорной информации о структуре памятника и основных этапах и объемах вмешательства в культурный слой. Обобщена пространственная информация из архивных и фондовых источников, освещающих архитектурные реконструкции и археологические исследования IX—XX вв. Собранный материал, послужил надежной основой для корректной интерпретации геофизических данных. На втором этапе выполнены собственными геофизическими исследованиями, включавшими обследование пола и стен церкви с помощью георадаров.

Георадарный метод широко применяется при археологических исследованиях в последние десятилетия, а использование георадаров при изучении архитектурных сооружений стало обычной практикой [Goodman, Piro, 2013; Conyers, 2017]. Метод основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов с частотами 50—1000 МГц электромагнитных волн с последующим приемом отраженных сигналов. Отражения возникают на границах раздела сред с различной электропроводностью, диэлектрической и магнитной проницаемостью, например, на контакте сухих и увлажненных грунтов. Метод позволяет выявлять локальные неоднородности в слое и определять их глубину. В архитектурно-археологических исследованиях георадар применяется при изучении элементов конструкций, зон растрескивания и замочания, а также для поиска и диагностики состояния коммуникаций и различных подземных сооружений.

На сегодняшний день существует обширная литература, посвященная георадарному сканированию в церквях (например [Varilaro et al., 2007; Panisova et al., 2016; Chernov et al., 2018]) и поиску подземных сооружений в лессовых породах, в том числе в Украине [Бондар та ін., 2016, 2018].

Георадарное сканирование в Ильинской церкви выполнено по полу в западной части нефа (поскольку восточная часть занята полукруглым выступающим дере-

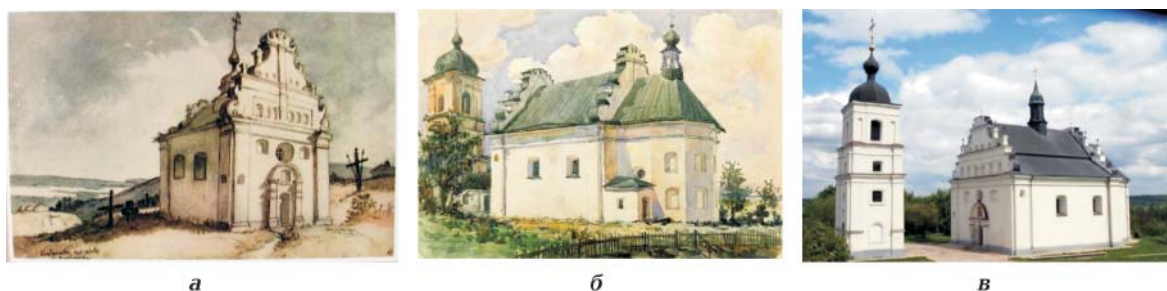


Рис. 1. Изображения Ильинской церкви в Субботове: *а* — рисунок Т. Шевченко (1845 г.), *б* — акварель Г. Логвина (1947 г.), *в* — современная фотография.

Fig. 1. Images of the Church of St. Elias in Subotiv: *a* — drawing by T. Shevchenko (1845), *б* — watercolor painting by G. Logvyn (1947), *в* — recent photograph.

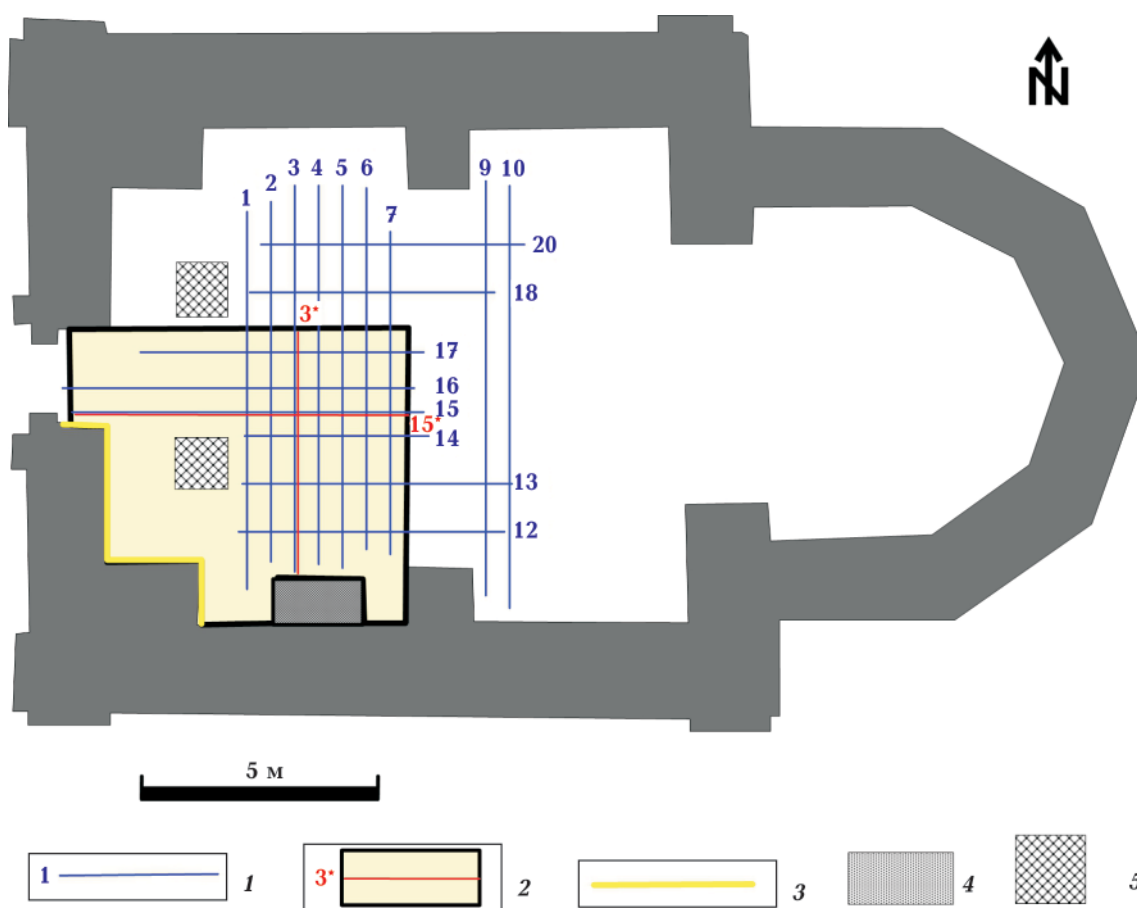


Рис. 2. Схема мест георадарных измерений в Ильинской церкви: *1* — профили, пройденные с георадаром 300 МГц, *2* — участок и отдельные профили измерений с георадаром 500 МГц, *3* — участки стен, обследованные с георадаром 500 МГц, *4* — символическое надгробие Б. Хмельницкого, *5* — колонны, поддерживающие хоры.

Fig. 2. Layout of profiles and areas measured with GPR in the Church of St. Elias: *1* — profiles acquired with 300 MHz antenna, *2* — area and selected profiles acquired with 500 MHz antenna, *3* — walls investigated with 300 MHz antenna, *4* — symbolic gravestone of Bohdan Khmelnytsky, *5* — columns supporting the choir upstairs.

вынным подиумом и недоступна для обследования), а также по стенам утолщения-колонны в юго-западном углу. Использовались георадары производства «Transient technologies» (Киев, Украина) VIY-3-300 и VIY-3-500 с центральными рабочими ча-

стотами 300 и 500 МГц соответственно.

По полу церкви данные были получены по сети профилей, пройденных в направлении с севера на юг, а также с запада на восток. Расстояние между профилями для георадара 300 МГц составляло 0,5 м, а для

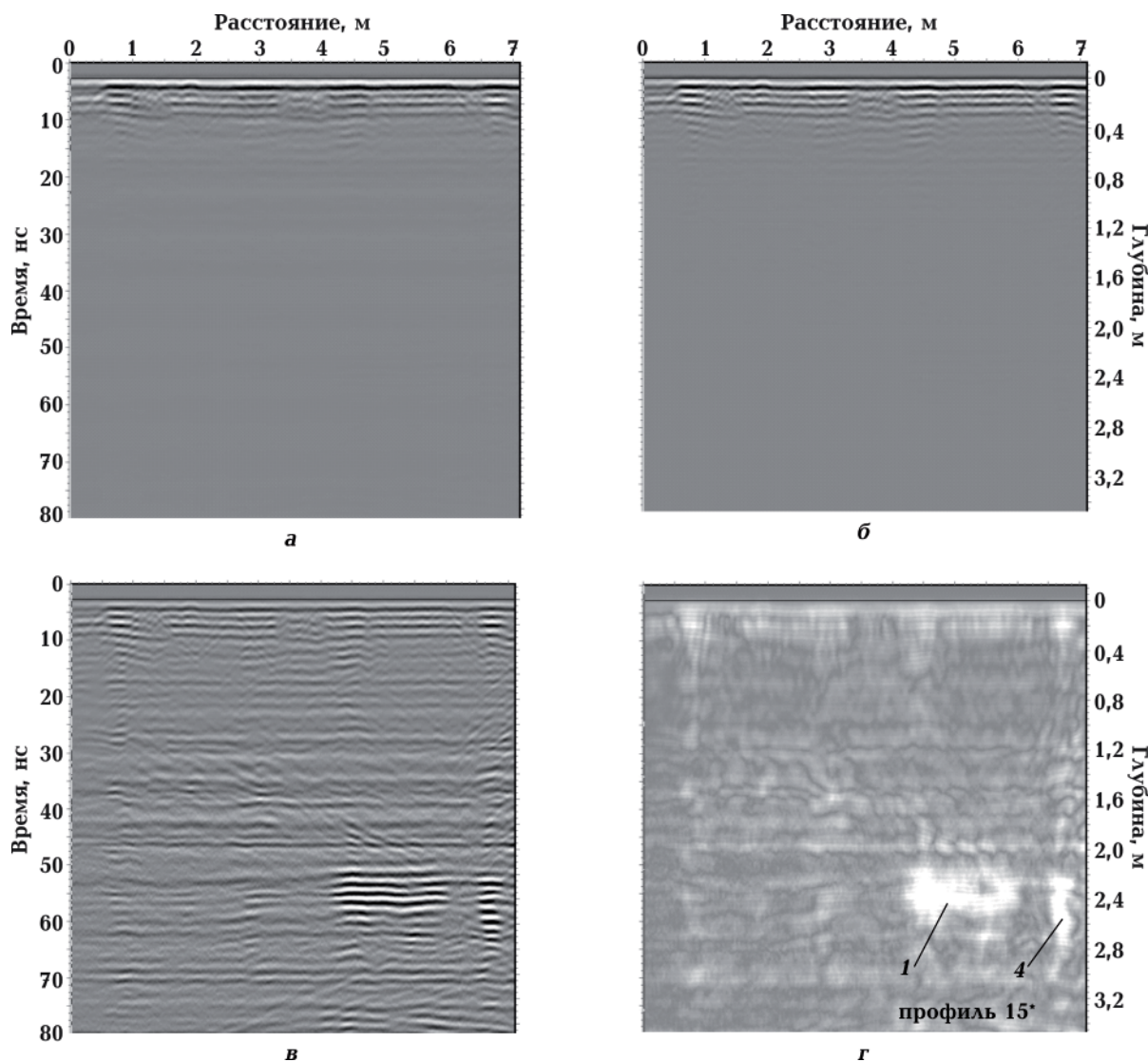


Рис. 3. Последовательность обработки радарограмм: *а* — сырая радарограмма, полученная с помощью георадара 500 МГц по линии профиля 15*, начало шкалы глубин (нулевой уровень) совмещено с точкой максимальной амплитуды прямого импульса; *б* — низкочастотные электромагнитные колебания и высокочастотный шум подавлены с помощью вейвлет-фильтрации с последующим отниманием усредненной трассы от каждой трассы профиля; *в* — выполнено усиление сигнала; *г* — применено преобразование Гильберта, позволившее подчеркнуть на радарограмме области с более высокой энергией сигнала. Цифрами обозначены аномальные зоны, пояснения в тексте.

Fig. 3. The GPR processing flow-chart: *a* — raw radargram, obtained with 500 MHz GPR along the profile 15*, the beginning of the depth scale is aligned with the maximal energy point of the direct pulse; *b* — dewow operation and wavelet filtering in order to suppress effectively low-frequency fluctuations and high-frequency noise; *v* — time gain, to adjust the acquisition gain function and enhance the visibility of deeper anomalies; *г* — Hilbert transformation, creating series of total amplitude reflection responses, for proper restoration of the location and shape of local objects on a profile. Anomalies are marked with figures and explained in the text.

георадара 500 МГц — 0,25 м. На рис. 2 показаны профили и участок сканирования.

Стены юго-западного угла церкви просканированы георадаром 500 МГц по сети перпендикулярных профилей с ячейкой 0,2×0,2 м.

Данные были получены в непрерывном режиме съемки, при этом выполнялось 500 замеров на трассе, временной диапазон составлял 240 нс, интервал между трассами составлял 32 мм. При обработке и интерпретации георадарных данных преимущественно использован стандартный набор фильтров программы Synchro 3 [Ivashchuk et al., 2019], рекомендованный производителем. Обработка данных состояла из последовательных шагов, проиллюстрированных на рис. 3: 1) закрепление нулевого уровня — для правильного определения глубины необходимо совместить начало шкалы глубин с определенной точкой прямого импульса (например, точкой максимальной амплитуды) (рис. 3, а); 2) вейвлет-фильтрация для эффективного подавления низкочастотных электромагнитных колебаний и высокочастотных шумов; 3) удаление фонового сигнала в заданном окне, в результате чего из каждой трассы профиля вычитается трасса в выбранном окне (ширина окна усреднения задается общим количеством в 300 трасс) (рис. 3, б); 4) усиление сигнала — для улучшения распознавания глубоких аномалий (рис. 3, в); 5) преобразование Гильберта — позволяет подчеркнуть на радарограмме области, отличающиеся от соседних более высокой или более низкой энергией сигнала (аномальные зоны) (рис. 3, г).

Средняя скорость электромагнитной волны в среде определена экспериментально по отклику от газовой трубы, находящейся на известной глубине в 20 м от церкви, и составляет 90 м/мкс.

После обработки радарограмм, полученных в результате площад-

ной съемки с георадаром 500 МГц, они были скомпонованы в трехмерном представлении в виде «куба» и визуализированы с помощью средств программы Planner. Трехмерная визуализация результатов площадной георадарной съемки позволила определить пространственное положение выделенных аномальных зон.

На третьем этапе работ с целью проверки правильности интерпретации георадарных данных в полу и стенах церкви было выполнено бурение сверлами малого диаметра с частичным отбором керна [Бевз та ін., 2019].

Для дополнительной заверки выделенных по результатам георадарных исследований аномалий было выполнено математическое моделирование георадарных данных. В процессе моделирования с помощью программы GrgMax по заданным геометрическим параметрам и физическим свойствам возмущающих объектов и вмещающей среды были сгенерированы

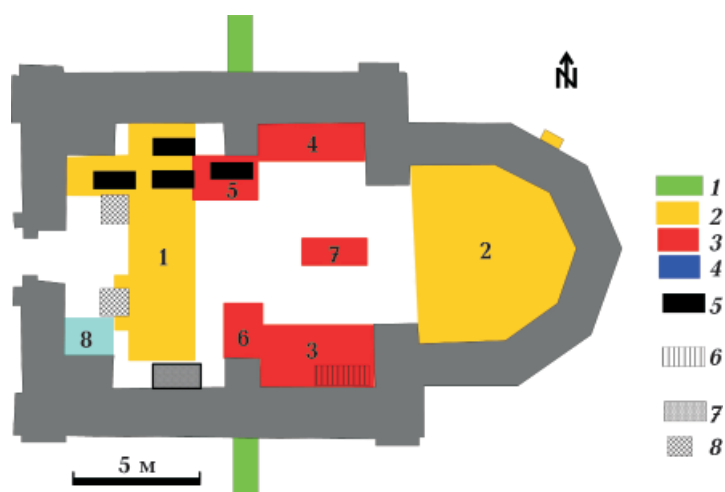


Рис. 4. План археологической изученности Ильинской церкви. Раскопы и зондажи: 1 — Г. Логвина, 1953 г., 2 — Р. Юры, 1970 г., 3 — П. Горишнего, 1971 г., 4 — Н. Шевченко и М. Новика, 2006 г., 5 — грунтовые захоронения, 6 — яма, интерпретированная как разрушенное захоронение Б. Хмельницкого [Горишний, 1971], 7 — символическое надгробие Б. Хмельницкого, 8 — колонны, поддерживающие хоры церкви.

Fig. 4. Plan of archaeological excavations in the Church of St. Elias. Trenches made by: 1 — G. Logvyn, 1953, 2 — R. Yura, 1970, 3 — P. Gorishniy, 1971, 4 — N. Shevchenko and M. Novyk, 2006, 5 — ground burials, 6 — the pit interpreted as the destroyed burial of Bohdan Khmelnytsky [Gorishnij, 1971], 7 — symbolic gravestone of Bohdan Khmelnytsky, 8 — columns supporting the choir upstairs.

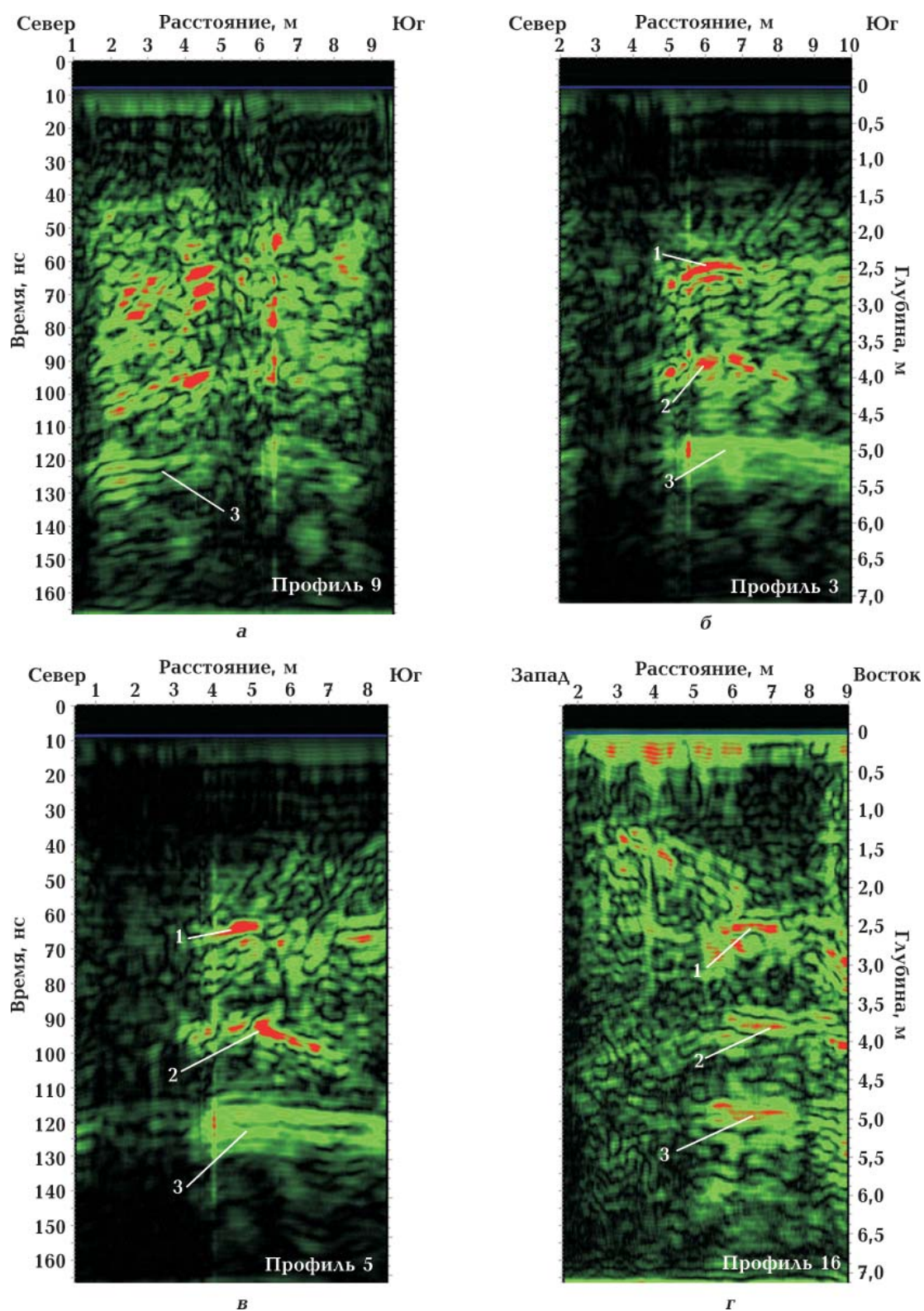


Рис. 5. Примеры радарограмм, полученных с помощью георадара 300 МГц. Цифрами обозначены аномальные зоны и границы, пояснения в тексте.

Fig. 5. Selected radargrams, obtained with 300 MHz GPR. Anomalies and boundaries are marked with figures and explained in the text.

синтетические радарограммы, которые впоследствии сравнивались с наблюдаемыми.

СргМах — это программное обеспечение с открытым кодом, которое имитирует распространение электромагнитных волн методом численного решения системы уравнений Максвелла конечными разностями на смещенных сетках Finite Difference Time Domain (FDTD) второго порядка аппроксимации, известным также как Yee algorithm [Warren et al., 2016].

Параметрами, используемыми при моделировании, являлись размеры и глубина залегания верхней и нижней кромок объекта, диэлектрическая проницаемость (ϵ), удельная электропроводность (χ_{ρ}) и магнитная проницаемость (μ_{ρ}) объекта и вмещающего грунта. Физические свойства получены из дополнительных полевых измерений.

Изучение геоэлектрического разреза и электрических свойств среды осуществлялось методом томографии электрического сопротивления (ТЭС) вдоль профиля 19, расположенного в 50 м к северу от Ильинской церкви. Измерения выполнены с помощью многоэлектродной электро-томографической установкой «ELIZA-1» [Хоменко та ін., 2013]. Установка имеет следующие основные характеристики: измерения осуществляются на постоянном токе; количество электродов — 64; шаг расстановки электродов — 1 м; количество измерительных каналов — 1. Для определения кажущегося сопротивления использована модификация симметричной четырехэлектродной установки. Учитывая малоглубинность исследований и использование многокаскадного фильтрующего входного тракта записи, электрометрические измерения осуществлялись при низком питающем напряжении порядка 40—50 В. Значения токов в линии АВ при этом находились в пределах 4—50 мА.

Обработка данных производилась в программе RES2dinv, позволяющей реализовывать блочные схемы решения прямой и обратной (инверсной) задач в классе 2-D моделей [Loke, Barker, 1996; Loke, 2009].

Для инверсии экспериментальных данных выбран алгоритм Occam-Marquardt, осуществляющий комбинированную гладко-контрастную схему инверсии, основанную на использовании Гаусс-Ньютоновского метода наименьших квадратов: Occam — инверсия с использованием сглаживающего оператора и дополнительной минимизацией контрастности, позволяющая получать гладкое распределение параметра (удельного сопротивления ρ); Marquardt — алгоритм инверсии, обеспечивающий получение контрастной модели распределения параметра среды. Использование гладко-контрастной схемы инверсии данных ТЭС позволяет блоки пространства с близкими определенными значениями удельного сопротивления объединять в один, тем самым реализовывать также послойную интерпретацию результатов зондирования с соответствующей выразительной визуализацией разреза.

Магнитная восприимчивость (k) отложений измерена портативным каппаметром КМ-7 (SatisGeo, Чехия) в ближайшем овраге, где обнажаются соответствующие слои.

Краткий обзор априорной информации о памятнике. Успех в интерпретации геофизических данных, полученных на объектах со сложной структурой, во многом зависит от полноты и надлежащего использования априорной информации.

Поэтому были проанализированы архивные материалы 1862—1890 гг., освещающие архитектурную реконструкцию Ильинской церкви [По отзыву ..., 1862; О выдаче ..., 1868; Татаров, 1888], а также сведения о реконструкциях 1970-х [Кілессо, 2000] и 2006 гг. [Стріленко, Калашник, 2006], материалы и отчеты об археологических раскопках памятника в 1953 г. [Логвин, 1954], 1970 [Юра, 1971], 1971 [Горішній, 1971], 2006 гг. [Шевченко, Новик, 2006]. В результате обработки письменных источников был составлен план археологической изученности церкви, позволяющий оценить объемы вмешательства в культурный слой XVII ст. (рис. 4). Ниже в хронологическом порядке приво-

дим наиболее важные в контексте нашего исследования сведения.

Возведенная в лучших традициях украинского козацкого барокко, церковь двести лет со времени постройки простояла без существенного ремонта. Однако к середине XIX ст. техническое состояние храма стало катастрофическим, и церковь подверглась основательной реставрации, которая была завершена к 1869 г. [О выдаче ..., 1868; Кукса, 2010; Юрченко, 2015]. На рис. 1, б показан внешний вид церкви после реставрации, вид ее значительно отличается как от первоначального (см. рис. 1, а), так и от современного (см. рис. 1, в). Тогда к церкви была пристроена галерея, сооружена колокольня [Кукса, 2010], а на южной стене появилась мемориальная табличка Б. Хмельницкого.

Первым профессиональным археологом, исследовавшим Ильинскую церковь, был И. Стеллецкий. В 1921 г. он снял слой штукатурки с той части южной стены церкви, где висела табличка и «справа от этого того-места, где легенда указывала двери, которые вели в подземную комнату церкви, в которой, мол, и похоронен Богдан». Стеллецкий сделал вывод, что здесь захоронения Гетмана никогда не было, да и не могло быть. Никаких раскопок в церкви он не проводил [Кукса, 2002б].

В 1953 г. в Субботове работал архитектор Г. Логвин. Непосредственно в церкви он не копал, но сделал два зондажа (шурфа) у северной и южной стен снаружи и выяснил, что фундаменты стен заглублены на 2,95 м от поверхности того времени [Логвин, 1954].

Археологические исследования непосредственно в здании Ильинской церкви велись Славянской экспедицией АН УССР под руководством Р. Юры в 1970 г. и П. Горишнего в 1971 г.

В 1970 г. проведены исследования в нефе (раскоп № 1 с прирезками) и полностью раскопана апсида церкви до уровня материка. Раскоп № 1 имел размеры 8,9×2,6 м и проходил мимо колонны, поддерживающей хоры, от северной стены до символического надгробия Б. Хмель-

ницкого. Раскоп № 1 был прокопан на глубину 1,65—1,77 м, вблизи фундамента северной стены найдены два захоронения в деревянных гробах и часть гроба третьего мужского захоронения. Первое от северной стены захоронение обнаружено на глубине 1,45 м, второе — на 1,6 м. Очевидно, что для раскопок третьего захоронения исследователям пришлось прирезать траншею между выступом северной стены и северной колонной. На одном из скелетов сохранились фрагменты шелкового пояса, который датирует это захоронение XVII ст.

Кроме того, в раскопе обнаружены остатки наземного славянского жилища XI ст., которое было уничтожено в результате пожара.

К раскопу № 1 были также прирезаны две ниши у южной колонны для выяснения глубины ее фундамента (которая оказалась равной 1,7 м).

Апсида храма была полностью раскрыта раскопом № 2. Здесь была обнаружена глубокая яма неизвестного происхождения, которая была засыпана известковым раствором, камнями и обломками кирпича XVII ст. Среди строительного мусора найдены обломки престола, который был заложен при сооружении церкви. Уровень материка составлял 1,85 м, яма была прокопана до глубины 2,4 м, вероятно искателями сокровищ.

В 1971 г. были исследованы площади у северной и южной стен, вблизи алтаря, а также в центральной части церкви. В раскопе № 3 на глубине 2 м расчищены контуры в лессе, а затем и сама яма размером 2,3×0,7 м. Рядом найден обломок, возможно, надгробной плиты, обгорелая доска, кусок материи и кость из человеческого ребра. Также следует отметить, что рядом в фундаменте есть две брешы (см. ниже рис. 6). Именно эта яма и была интерпретирована автором исследований П. Горишним как разоренная могила Б. Хмельницкого. По мнению автора раскопок, грабители проникли в могилу и вытащили гроб через пролом в фундаменте [Горишний, 1971].

В раскопе № 4, у северной стены, ар-

хеологических находок нет, он прокопан на глубину 2,8 м.

В шурфе № 5 на глубине 1,9 м обнаружено захоронение мужчины 40—45 лет в ист-

левшем деревянном гробу. При нем найден крестик из кожи, больше никакого сопровождающего материала не обнаружено.

В шурфе № 6 у южной полуколонны

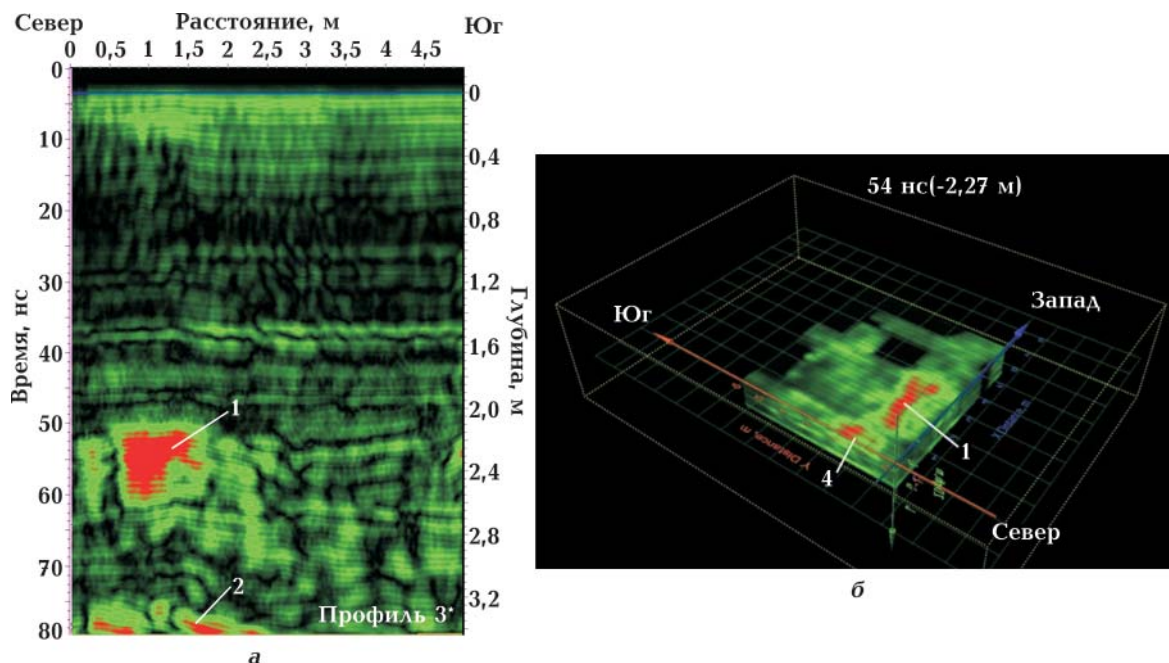


Рис. 6. Пример радарграммы (а) и С-скана (б), полученных с помощью георадара 500 МГц. Цифрами обозначены аномальные зоны, пояснения в тексте.

Fig. 6. Selected radargram (a) and C-scan (б), obtained with 500 MHz GPR. Anomalies are marked with figures and explained in the text.

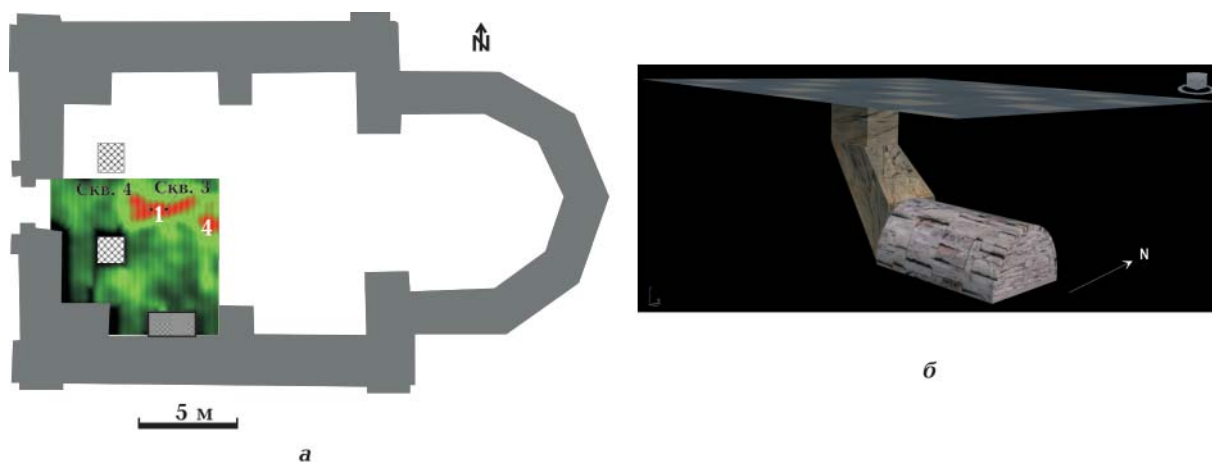


Рис. 7. Горизонтальный срез (С-скан), наложенный на план церкви и дающий представление о положении камеры подземного объекта (а) и его трехмерная модель (б). Цифрами обозначены аномальные зоны, пояснения в тексте. Черными квадратами показаны буровые скважины.

Fig. 7. Horizontally cut slide (C-scan) at 54 ns imposed onto the plan of the church, showing the location of underground structure (a) and its 3D model (б). Anomalies are marked with numbers and explained in the text. Boreholes are marked with black squares.

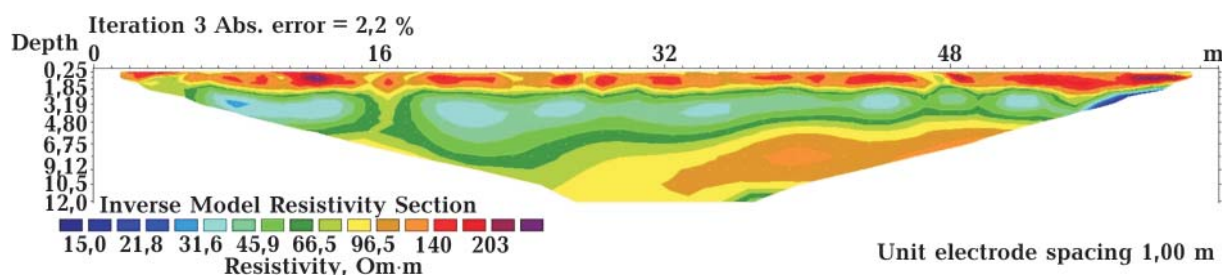


Рис. 8. Геоэлектрический разрез по профилю, расположенному в 50 м к северу от Ильинской церкви.

Fig. 8. Geoelectrical section along the profile located at 50 m to the north from the Church of St. Elias.

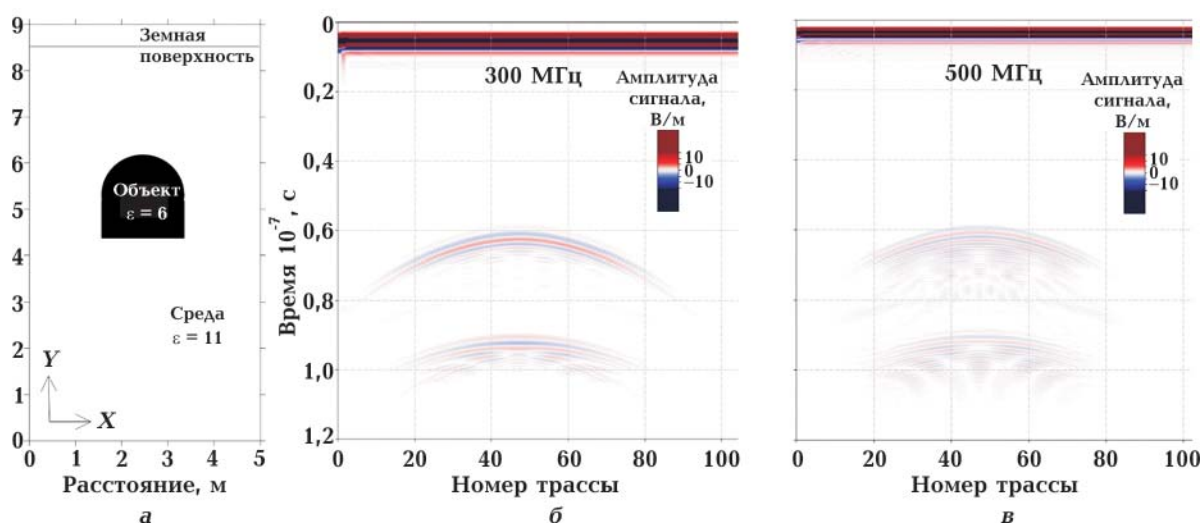


Рис. 9. 2D геометрическая модель (а) и синтетические радарограммы, полученные в результате численного моделирования отклика от модели для частоты зондирования 300 МГц (б) и 500 МГц (в).

Fig. 9. 2D geometry model (a) and synthetic radargrams, obtained as a result of numerical simulation of the response from a model for 300 MHz antenna (b) and 500 MHz antenna (v).

обнаружена часть древнеславянской печи X—XI ст. — продолжение жилища, открытого археологами в 1970 г.

Центральный шурф № 7 размером 2,0×1,0 м прокопан на глубину 2 м. Находок не содержал.

В 1970-х гг. в церкви был выполнен большой объем реставрационно-восстановительных работ по проекту архитектора С. Килессо, который стремился восстановить первоначальный вид храма. Реставрационные работы продолжались до 1977 г. [Кукса, 2010]. При этом цоколь храма был вновь открыт на высоту 1 м.

Реставрация 2006 г. не изменила облик храма, ей предшествовали раскопки в юго-западном углу нефа. Раскоп № 8 от

2006 г. имеет размеры 2,0×1,5 м при общей достигнутой глубине 2,8 м от уровня пола. Археологических находок не содержал [Шевченко, Новик, 2006; Новик, 2006].

Результаты георадарного сканирования и проверочного бурения. Сканирование по полу церкви. В качестве «фоновой» радарограммы, отражающей геологическое строение верхней части разреза под церковью, рассмотрим радарограмму 9, полученную с помощью георадара 300 МГц (рис. 5, а). Верхняя часть разреза представляет собой толщу естественных и культурных почвенных напластований до времени 42—48 нс (или глубины 1,50—1,75 м), что примерно соответствует уровню «материка», выявленного Р. Юрой в раскопе № 1

(1,77 м) [Юра, 1970]. Ниже, во временных границах 50—125 нс (1,8—5,0 м), выделяется слой с усиленной амплитудой электромагнитного сигнала, соответствующий «материковому» грунту или лессовидному суглинку, очевидно обладающему большей влажностью, нежели вышележащий слой. Нижняя граница этого слоя хорошо выражена, что позволяет предполагать значительную разницу диэлектрической проницаемости с нижележащим слоем.

Радарограммы по профилям 3—7 показывают наличие отражающей границы 1 на 62 нс, длина которой невелика, однако превышает длину волны георадара (1 м), т. е. это неточечный объект для антенны с центральной частотой 300 МГц. Ниже наблюдаем воздушную дифрагированную волну-помеху, которая накладывается на короткую (около 2,0 м), отражающую границу 2 на 92 нс (рис. 5, б, в). Также на радарограммах присутствует отражающая граница 3 на времени 117—125 нс (4,9—5,4 м), соответствующая контакту двух геологических горизонтов с различной литологией либо содержанием влаги.

Повторное обследование той же площади георадаром 500 МГц позволило детализировать изображение аномалии 1, которая проявляется в виде зоны усиленной амплитуды сигнала во временном интервале 51—61 нс, (рис. 6, а, б), что позволяет предполагать в этом месте зону разуплотнения либо пустоту. На горизонтальном срезе (так называемом С-скане) это линейная аномалия, имеющая ширину около 1,3 м, вытянута в направлении от входа к алтарю (З—В) на 3 м (рис. 6, в, г). На границе временной развертки прибора, во временном интервале 77—80 нс заметна также зона, соответствующая аномалии 2.

Информация, полученная с помощью двух георадаров, может быть интерпретирована как наличие в толще лессовидного суглинка подземного сооружения с максимальной площадью 3,0×2,0 м, имеющего арочный свод (верх аномальной зоны 1) и пол (аномалия 2). Согласно данным, полученным георадаром 500 МГц, аномалия 1

имеет ограниченную толщину и может быть интерпретирована как зона разуплотнения или даже пустота под сводом подземелья, основная часть которого засыпана грунтом. По той же причине, вероятно, не зафиксированы отражения от стен, так как разница диэлектрической проницаемости вмещающей породы и засыпки объекта невелика.

Небольшую аномалию 4, заметную на радарограммах и С-сканах к востоку от основной, авторы склонны считать помехой от металлического объекта, расположенного близко к поверхности, поскольку можно проследить характерный «звон» с начала временной развертки сигнала (см. рис. 3, г, 6, б, 7, а).

На радарограммах из привходовой части церкви между колоннами, поддерживающими хоры, заметны отражения от наклонной поверхности — вероятно, признаки входного туннеля в подземное сооружение (см. например рис. 5, г). Однако следует признать, что четкого изображения входного туннеля нам получить не удалось.

Сложно однозначно ответить на вопрос о высоте камеры подземного объекта. При принятом допущении о средней скорости электромагнитной волны, равной 90 м/мкс, объект фиксируется во временном интервале 51—77 нс (глубина 2,15—3,35 м) и имеет высоту 1,2 м по данным георадара 500 МГц и в интервале 62—92 нс (глубина 2,40—3,70 м) и имеет высоту 1,3 м по данным георадара 300 МГц. Разница во временных показаниях георадаров двух частот объясняется измерительной погрешностью аппаратуры и не превышает разрешающей способности более низкочастотного георадара (30 см). Глубины, полученные георадаром 300 МГц, использованы при построении трехмерной модели и позднее уточнены после разбуривания аномалии.

На основании полученной информации нами предложена трехмерная модель-реконструкция подземного сооружения, находящегося под полом Ильинской церкви (рис. 7, б).

Сканирование стен юго-западного угла церкви выполнено с помощью георадара 500 МГц для поиска возможного входа в подземное сооружение. Такая идея возникла в связи с тем, что в симметричном утолщении западной стены напротив устроена лестница на хоры. Однако георадарное обследование стен не выявило аномалий, которые могли бы быть интерпретированы как пустоты.

Результаты проверочного бурения в полу и стенах. Бурение в полу и стенах церкви выполнено под руководством архитекторов Н. Бевза и Ю. Лукомского [Бевз та ін., 2019]. Две скважины в полу церкви (№ 3 и 4) были нацелены на центральную часть аномальной зоны (см. рис. 7, а). Они имели диаметр 4 см и позволили установить горизонты с различной плотностью в верхнем слое и проследить стратиграфию по эпизодическому керновому материалу, а также по сопротивлению слоев буровому инструменту. Стратиграфия скв. 4 сверху вниз (пробурена после снятия плитки):

0,0—0,3 м — термоизоляционный слой шарикового пенопласта;

0,3—1,9 м — сухой супесчаный материал засыпки раскопа 1970 г.;

1,9—2,4 м — плотный влажный суглинок;

2,4—4,0 м — разуплотненный супесчано-суглинистый слой, вероятно, засыпка подземного объекта;

глубже 4,0 м — плотный влажный желтый суглинок.

Эти данные были использованы для уточнения параметров модели при решении прямой задачи георадиолокации.

Наблюденная глубина свода объекта совпала с предсказанной по данным измерений с георадаром 300 МГц, однако пол объекта оказался глубже, чем ожидалось, на 0,3 м. Это можно пояснить отличием электрофизических свойств засыпки объекта от вмещающего грунта. Засыпка менее плотная, т. е. обладает меньшей диэлектрической проницаемостью, а значит, и фактическая скорость электромагнитной волны в ней превышает 90 м/мкс.

Бурение не выявило крупных пустот в

стенах юго-западного угла церкви, однако небольшие пустоты, обнаруженные с помощью инспекционной камеры, запущенной в сважины, по мнению архитекторов, образовались в процессе замурования каких-то камер либо проходов [Бевз та ін., 2019].

Моделирование аномальной зоны. При моделировании геометрические параметры для исследуемой среды и объекта были взяты согласно интерпретации георадарных данных с уточненными глубинами границ по данным бурения. Физические свойства исследуемой среды и объекта определены из независимых измерений. Для источника и приемника электромагнитной волны задавались параметры (частота, форма сигнала, шаг исследований, глубинность), наиболее приближенные к тем, которые были использованы при исследованиях.

Моделируемый объект представляет собой камеру с арочным сводом (рис. 7, б). В поперечном разрезе верх объекта расположен на глубине 2,4 м, пол — на глубине около 4,0 м, ширина по полу составляет около 2 м и уменьшается кверху (рис. 9, а).

Относительная диэлектрическая проницаемость среды определена исходя из фактической глубины свода объекта, которая составляет 2,4 м при скорости электромагнитной волны в среде 90 м/мкс.

В георадиолокации при допущении о малости потерь в среде (т. е. мнимая часть относительной диэлектрической проницаемости, связанная с конечной проводимостью диэлектрика, равна 0) скорость распространения электромагнитных импульсов напрямую связана с действительной частью относительной комплексной диэлектрической проницаемости среды (ϵ):

$$v = \frac{\tilde{n}}{\sqrt{\epsilon}},$$

где c — скорость света в вакууме.

В нашем случае для вмещающего грунта $\epsilon=11$, а для менее плотной супесчано-суглинистой засыпки объекта возьмем несколько меньшую величину, $\epsilon=6$.

Удельную электропроводность грунта (χ , ρ) легко вычислить, как величину, об-

ратную электрическому сопротивлению на заданной частоте зондирования (ρ_f). ρ_f может существенно отличаться от удельного сопротивления грунта на постоянном токе (ρ_{const}), так как зависит не только от типа породы, ее влагосодержания и минерализации, но и от частоты электромагнитной волны. Общей закономерностью является уменьшение удельного сопротивления с ростом частоты. Исходя из эмпирических сведений, изложенных в работе [Владов и Старовойтов, 2004], для частот 300—500 МГц коэффициент $k = \rho_{\text{const}} / \rho_f$ взят равным 10. ρ_{const} мы определили по данным ТЭС. Для фонового профиля № 19 с горизонтальным залеганием слоев рассчитаны следующие интегральные значения удельного сопротивления: 0—2,0 м — 100—200 Ом·м, 2,0—5,0 м — 30—70 Ом·м, глубже 5,0 м — 70—120 Ом·м (рис. 8). Таким образом, среднее значение ρ_{const} грунта в интервале глубин 0—5,0 м взято равным 40 Ом·м, а для заполнения объекта $\rho = 100$ Ом·м. Нетрудно вычислить, что χ_f будет составлять 0,0025 и 0,001 См/м для среды и объекта соответственно.

Магнитная восприимчивость (k) суглинков и супесков, обнажающихся в овраге возле церкви, не превышала $0,2 \dots 0,3 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ, а для поверхностной почвы достигала $0,6 \cdot 10^{-3}$ ед. СИ. Вероятно, засыпка объекта имеет такую же k , как и вмещающий суглинок. Можем определить магнитную проницаемость среды (μ_r), которая связана с магнитной восприимчивостью соотношением $\mu_r = 1 + k$. Заметим, что частотной зависимостью k в данном случае можно пренебречь.

Другими словами, μ_r как грунта, так и объекта составляет 1,0003.

В результате входной файл для построения синтетической радарограммы для центральной частоты георадара 300 МГц в программе GprMax выглядит следующим образом:

```
1 #title: B-scan Subotiv 300 MHz
2 #domain: 15.5 9.0 0.002
3 #dx_dy_dz: 0.02 0.02 0.002
4 #time_window: 120e-9
5 #material: 11 0.0025 1.0003 0 soil
```

```
6 #material: 6 0.001 1.0003 0 obj
7 #waveform: ricker 1 0.3e9 my_ricker
8 #hertzian_dipole: z 0.02 8.6 0.001 my_ricker
9 #rx: 0.36 8.6 0.001
10 #src_steps: 0.06 0 0
11 #rx_steps: 0.06 0 0
12 #box: 0 0 0 15.00 8.5 0.002 soil
13 #cylinder: 3.0 5.2 0 3.0 5.2 0.002 0.9 obj
14 #box: 2.1 4.3 0 3.9 5.2 0.002 obj.
```

Здесь строка 1 — условное название модели; строка 2 — задаются геометрические параметры исследуемой среды (в метрах): 15,5 — длина, 9,0 — высота, 0,002 — ширина; строка 3 — дискретность пространства (по трем осям — Δx , Δy , Δz); строка 4 — временное окно для моделирования (Δt); строка 5 — характеристика вмещающих пород; 11 — относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть), 0,0025 — удельная электропроводность (См/м), 1,0003 — относительная магнитная проницаемость, 0 — диэлектрическая проницаемость (мнимая часть) (magnetic loss) (Ом/м), soil — название материала с данными характеристиками; строка 6 — характеристика материала для объекта (описание соответственно строке 5); строка 7 — характеристика источника сигнала: 1 — амплитуда, 0,3e9 — частота 300 МГц, my_ricker — форма сигнала отвечает импульсу Рикера; строка 8 — начальное положение излучателя; строка 9 — начальное положение приемника; строка 10 — шаг исследований для излучателя; строка 11 — шаг исследований для приемника; строка 12 — вмещающие породы, которые заданы в виде объекта параллелепипедной формы с соответствующими координатами нижнего левого угла (первые три числа) и верхнего правого (следующие три числа), soil — материал объекта с соответствующими ранее заданными параметрами (строка 5); строка 13, 14 — подземный объект, который задан как объект арочной формы (комбинация цилиндра и параллелепипеда) (описание в соответствии со строкой 12, материал — строка 6).

На рис. 9 представлена визуализация 2D

модели арочного объекта в среде и синтетические радарограммы, рассчитанные для зондирующих частот 300 и 500 МГц. Полученные радарограммы схожи с результатами фактических измерений с георадарами 300 и 500 МГц (см. рис. 5, 6), что можно рассматривать в качестве дополнительного подтверждения интерпретации (присутствия подземного объекта с арочным сечением под полом церкви).

Обсуждение. Для чего же могло служить подземелье, предполагаемое в Ильинской церкви? Наиболее часто встречающаяся, если не единственно возможная, функция подземелья в церкви — погребальная [Слукин, 1991].

Архитекторы и историки отмечают, что объемно-пространственная композиция Ильинской церкви близка по типу к небольшим костелам. В то же время некоторые особенности архитектуры фасадов свидетельствуют о попытке возродить определенные черты древнерусского зодчества [Килессо, 2000; Кукса, 2010; Юрченко, 2015].

Подземное сооружение имеет особенности конструкции и расположения, характерные для усыпальниц как католической, так и православной традиции. Это — глубоко заложенный склеп, расположенный в центральной части нефа и сооруженный подземным способом (т.е. без нарушения целостности свода).

Указание на способ захоронения Б. Хмельницкого именно в склепе находим в Метрике Ильинской церкви, составленной в октябре 1888 г. учителем Медведовской Церковно-приходской школы Алексеем Татаровым. Руководствуясь, вероятно, положением мемориальной таблички Б. Хмельницкого, в разделе «Наружные части церкви» он пишет следующее.

«С правой стороны церкви около средней колонны немного к западу находится **склеп Зиновия Богдана Хмельницкого и его сына Тимофея**, забросанный мусором во время перестройки церкви» [Татаров, 1888].

Захоронения в подземных склепах, обычные в католической традиции, также встречаются в православных храмах Укра-

ины в XVII—XVIII ст. Например, это ктиторское захоронение М. Миклашевского (ум. 1706 г.) в подземном сооружении в подвале монастырской церкви св. Георгия в Выдубецком монастыре в Киеве, построенной в 1696—1701 гг. [Бобровский, 2002] или погребение Адама Киселя (ум. 1653 г.) в крипте Успенской церкви в Низкиничках (Волинская обл.) [Вортман, 2013].

Расположение погребений по центру привходовой части нефа характерно больше для католических храмов. В православной традиции со времен Древней Руси существует практика сооружения глубоких рукотворных пещер, в лессовых породах, использовавшихся как в культовых целях, так и для погребений [Слукин, 1991]. Совместным влиянием этих традиций можно объяснить, почему склеп в Ильинской церкви был устроен так глубоко и сооружен подземным способом.

Отметим, что предполагаемый склеп находится непосредственно под раскопом № 1 Р. Юры в 1970 г., который достигал глубины 1,77 м и не выявил вторжения в культурный слой с поверхности. Р. Юра остановил раскопки, пройдя все культурные напластования и углубившись в материковый грунт. Перекрытие же склепа находится на глубине 2,40 м, объект вырезан в материковом лессовидном суглинке.

В отчете Р. Юры про раскопки 1970 г. находим косвенное подтверждение наличия входного тоннеля в склеп. Он отмечает, что фундаментная плита южной колонны, которая поддерживает хоры, смещена на 20 см к северу и на 9 см к востоку [Юра, 1970]. Это могло произойти в случае существования пустоты между колоннами.

Выводы. Обследование Ильинской церкви-усыпальницы Богдана Хмельницкого в Субботове георадарным методом показало наличие подземного сооружения в центральной части нефа. Глубина до свода составляет 2,40 м, высота от пола до потолка 1,6 м, площадь по полу 3×2 м. Наклонный входной тоннель предположительно располагается в западной части нефа возле входа в церковь. Сооружение, вероятно, почти полностью засыпано грунтом.

Объект построен подземным способом, он располагается под раскопом Р. Юры 1970 г. Результаты геофизической интерпретации подтверждены проверочным бурением, в ходе которого в толще выявлена зона разуплотнения, соответствующая засыпке объекта.

Не исключено, что сооружение является склепом-усыпальницей Гетмана Украины Богдана Хмельницкого, о наличии ко-

торого упоминается в Метрике Ильинской церкви от 1888 г. [Татаров, 1888].

Исследования иницированы и профинансированы ГО «Фонд Великий льох».

The authors would like to acknowledge the contribution of the COST Action SAGA: The Soil Science & Archaeo-Geophysics Alliance — CA17131 (www.saga-cost.eu), supported by COST (European Cooperation in Science and Technology).

Список литературы

- Бевз М., Виногородська Л., Лукомський Ю. Звіт з виконання архітектурно-археологічних досліджень в приміщеннях пам'ятки архітектури національного значення (охор. №777) — церкви св. Пророка Іллі в с. Субботів Чигиринського р-ну Черкаської обл., об'єкта Національного заповідника «Чигирин»: у 2 т. Львів, 2019.
- Бобровський Т. А. Науковий звіт про археологічні дослідження залишків підземної споруди у церкві св. Георгія Видубицького монастиря у м. Києві. Науковий архів ІА НАНУ, 2002. 16 с.
- Бондар К. М., Ієвлев М. М., Петраускас А. В., Тарабукін О. О., Хададова М. В., Цюпа І. В. Древлянські старожитності. Археологічні дослідження в Житомирі. Київ: Стародавній світ, 2018. 188 с.
- Бондар К., Бобровський Т., Цюпа І. Вивчення ефективності георадарних досліджень на території Національного заповідника «Софія Київська» для вирішення археологічних завдань. *Геоінформатика*. 2016. № 4(60). С. 75—82.
- Величко С. В. Літопис. Т. 1. Київ: Дніпро, 1991. 371 с.
- Владов М. Л., Старовойтов А. В. Введение в георадиолокацию. Учебное пособие. Москва: Изд. МГУ, 2004. 153 с.
- Вортман Д. Я. Успенська церква в Низкиничках (XVII ст.). В кн.: *Енциклопедія історії України*. Т. 10. Гл. ред. В. А. Смолій. Київ: Наук. думка, 2013. С. 248.
- Горішній П. А. Звіт про археологічні дослідження Суботівської середньовічної експедиції Інституту археології АН УРСР у 1971 р. Архів ІА НАНУ.
- Кілессо С. Архітектурні і мистецькі скарби Богданового краю. Київ, 2000. 144 с.
- Крип'якевич І. П. Богдан Хмельницький. Відп. ред. Ф. П. Шевченко, І. Л. Бутич, Я. Д. Ісачевич. 2-е вид., виправлене і доповнене. Львів: Світ, 1990. 408 с.
- Кукса Н. В. З історії Богданових церков у Субботові. *Пам'ятки України*. 2002а. № 2. С. 40—47.
- Кукса Н. В. Історичні поховання XVII—XVIII ст. в Субботові. *Козацька скарбниця: Гетьманські читання*. 2006. Вип. 3. С. 97—111.
- Кукса Н. В. Наукові «досліди Гната Яковича Стеллецького по з'ясуванню історичної тайни Богдана» в Субботові (20-ті рр. XX ст.) *Археологічний літопис Лівобережної України*. 2002б. № 2. С. 156—159.
- Кукса Н. В. Свято-Іллінська церква в Субботові: основні етапи реставрації пам'ятки архітектури середини XVII ст. Сіверщина в історії України: Зб. наук. пр. Вип. 3. Київ-Глухів, 2010. С. 31—35.
- Кукса Н. В., Діденко Я. Л. Наддніпрянська мивушина. XVIII—XX століття. Черкаси: Вертикаль, 2018. 300 с.
- Літопис гадяцького полковника Григорія Грабянки. Пер. із староукр. Київ: Знання України, 1992, 192 с.
- Літопис Самовидця. Ред. Я. І. Дзира. Київ: Наук. думка, 1971. 208 с.
- Логвин Г. Чигирин. Суботів: архітектурно-історичний нарис. Київ, 1954. 72 с.

- Новик М. Обставини поховання і місцезнаходження могили Богдана Хмельницького. *Історико-географічні дослідження в Україні: зб. наук. праць*. 2006. Т. 9. С. 204—210.
- О выдаче пособия казны на постройку церкви в с. Субботовка. Державний архів Київської області. 1868. ф. 17, оп. 1, спр. 375.
- По отзыву Киевского Митрополита об исправлении и оставлении в с. Субботовке церкви для сохранения древности ея. (1862—1863). Центральный державный исторический архив Украины, м. Київ, ф. 442, оп. 295, спр. 5.
- Слукин В. М. Архитектурно-исторические подземные сооружения (типология, функция, генезис). Свердловск, 1991. 236 с.
- Смолій В. А., Степанков В. С. Богдан Хмельницький (Соціально-політичний портрет): 3 вид., перероб. Київ: Темпора, 2009. 679 с.
- Стріленко Ю., Калашник Ю. Пам'ятка архітектури 17 ст. Іллінська церква в с. Суботів Черкаської області. Охоронний номер 777. Звіт про науково-технологічне обстеження стану матеріалів та конструкцій церкви. Рекомендації з технології виконання робіт. Черкаси, 2006. 19 с.
- Татаров А. Метрика для получения верных сведений о древне-православных храмов Божих, зданий и художественных предметов. Село Субботово Чигиринского уезда Киевской губернии. Рукописный архив ИИМК. 1888. Ф. Р-III, № 2278.
- Хоменко Р., Бондар К., Попов С. Нова малоглибинна багатоелектродна установка вимірювання електричного опору. *Вісник Київ. ун-ту. Геологія*. 2013. № 2(61). С. 36—40.
- Черниговская летопись по новому списку (1587—1725) и Коломацкие челобитные с предисловием А. Лазаревского. Киев, 1890. 43 с.
- Шевченко Н. П., Новик М. М. Звіт про роботу Правобережної розвідувальної експедиції у 2005—2006 рр. Архів Інституту археології НАНУ.
- Юра Р. О. Звіт про роботу Слов'янської експедиції Інституту археології АН УРСР в селі Субботові, Чигиринського району Черкаської області у 1970 році. Архів ІА НАНУ.
- Юрченко С. Ю. Реставрація Іллінської церкви у Субботові в середині XIX століття мовою документів. *Праці Центру пам'яткознавства*. 2015. Вип. 27. С. 33—49. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Prp_2015_27_5.
- Barilaro, D., Branca, C., Gresta, S., Imposa, S., Leone, A., & Majolino, D. (2007). Case study. Ground penetrating radar (G.P.R.) surveys applied to the research of crypts in San Sebastiano's church in Catania (Sicily). *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 73—76. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.003>.
- Gawroński, F. (1903). Wycieczki historyczno-archeologiczne po Ukrainie: Wiszenki, Borowica, Czechryń, Subotiw. *Studia i szkice historyczne. Ser. 1, 1*, 263—269.
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Springer, 233 p.
- Chernov, A., Dziubacki, D., Cogoni, M., & Bădescu, A. (2018). First conclusions about results of GPR investigations in the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Kłodzko, Poland. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7(1), 123—128. <https://doi.org/10.5194/gi-7-123-2018>.
- Conyers, L. B. (2017). Ground-penetrating Radar. In: A. Gilbert (Ed.), *Encyclopedia of Geoarchaeology* (pp. 367—379). Heidelberg, London, New York: Springer.
- Ivashchuk, V., Borodavka, V., Prokhorenko, V., Chu Xin, & Pavluk, A. (2019). *Synchro 3. Ver. 3.11.1.5*. Retrieved from http://viy.ua/download/install_VIY_SGPR.zip.
- Loke, M. H. (2009). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. 144 p.
- Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131—152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>.
- Paniso, J., Murín, I., Paštka, R., Haličková, J., Brunčák, P., Pohánka, V., Papčo, J., & Milo, P. (2016). Geophysical fingerprints of shallow cultural structures from microgravity and GPR measurements in the Church of St. George, Svätý Jur, Slovakia. *Journal of Applied Geophysics*, 127, 102—111. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.02.009>.

Warren, C., Giannopoulos, A., & Giannakis, I. (2016). GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for

Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163—170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>.

Results of the ground penetrating radar survey in the church of St. Elias — Bohdan Khmelnytsky burial vault in Subotiv

K. M. Bondar¹, R. V. Khomenko¹, A. P. Chernov¹, N. V. Kuksa², 2020

¹Taras Shevchenko National University of Kiev, Kiev, Ukraine

²«Chyhyryn» National Historical and Cultural Reserve, Cherkasy Region, Ukraine

Archaeogeophysical investigations in the Church of St. Elias in Subotiv (Cherkasy region, Ukraine) were conducted in the course of critical revision of the historical myth that exists around this monument, known as the burial vault of Bohdan Khmelnytsky, Hetman of the Zaporozhian Cossack Army and the founder of the Ukrainian state. The aim of the study was to search for hidden structures in the walls and under a floor of the Church. The paper presents investigation that combined georadar (GPR) survey, preceded by a careful review of historical and archaeological sources, and then followed up with forward modelling and test drilling to verify and supplement the geophysical results. The measurements were carried out using VIY-3 georadars operating at 300 and 500 MHz frequency by floor of the nave and by walls of the south-west corner of the church. In the central part of the church, at the depths of 2.4 and 4.0 m, anomalies were identified from the vault and the floor of the underground structure, stretching along E-W direction, which is probably almost completely filled with soil. Drilling at the place of anomaly has confirmed presence of decompacted zone corresponding to infill. Synthetic radargrams calculated using the GprMax program, using geometric parameters of the object interpreted from the GPR data and the physical properties of soils measured by independent methods, have close similarity with those observed. No large cavities were found in the walls of the southwestern corner utilizing GPR method.

Taking into consideration the inconsistency of the chronicle version about the destruction of the grave of B. Khmelnytsky by Polish szlachta troops in 1664, the structure may appear to be his burial crypt, whose presence is evidenced in written historical sources.

Key words: georadar, the Church of St. Elias, underground structure, Bohdan Khmelnytsky, dielectric permittivity, loam

References

- Bevz, M., Vynogrodska, L., & Lukomskyi, Yu. (2019). The report on archaeological-architectural investigations in the building of (regist. No777) — the Church of St. Elias in the village of Subotiv, Chyhyryn dist., Cherkasy region, the object of the National Reservation «Chyhyryn»: in 2 volumes. Lviv (in Ukrainian).
- Bobrovsky, T. (2002). *The report on archaeological investigations of the remains of an underground structure in the Church of St. Georgy of the Vydubitsky Monastery in Kyiv*. Archive of the Institute of Archaeology of the NAS of Ukraine. 16 p. (in Ukrainian).
- Bondar, K. M., Iyevlev, M. M., Petrauskas, A. V., Tarabukin, O. O., Khadadova, M. V. & Tsiupa, I. V. (2018). *Drevlyanian's antiquity. Archaeological investigations in Zhytomyr*. Kyiv: Starodavnii svit, 188 p. (in Ukrainian).
- Bondar, K., Bobrovskyi, T., & Tsiupa, I. (2016). Efficiency of GPR Survey for Archaeological Targets Detection in the National Conservation Area of «St. Sophia of Kyiv». *Geoinformatika*, (4), 75—82 (in Ukrainian).
- Velychko, S. V. (1991). *The Chronicle*. Kyiv: Dni-pro, Vol. 1, 371 p. (in Ukrainian).
- Vladov, M. P., & Starovojtov, A. V. (2004) An introduction to ground penetrating radar. — Moscow, published by MSU, 153 p. (in Russian).
- Wortman, D. Ya. (2013). *The Assumption Church*

- in Nyzkynychi (XVII c.). In V. A. Smolii (Ed.), *Encyclopedia of History of Ukraine* (Vol. 10, P. 248). Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).
- Gorishnii, P. A. (1971). *Report on archeological research of the Subotiv Medieval Expedition of the Institute of Archeology of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR in 1971*. Archive of the Institute of Archaeology of the NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Killesso, S. (2000). *Architectural and artistic treasures of Bohdan`s region*. Kyiv, 144 p. (in Ukrainian).
- Krypiakevich, I. P. (1990). *Bohdan Khmelnytsky*. Lviv: Svit, 408 p. (in Ukrainian).
- Kuksa, N. V. (2002a). To the history of Bohdan`s churches in Subotiv. *Pamiatky Ukrainy*, (2), 40—47 (in Ukrainian).
- Kuksa, N. V. (2006). Historical burials from XVII—XVIII cent. in Subotiv. *Kozats'ka skarbnitsya: Het'mans'ki chytannya*, (3), 97—111 (in Ukrainian).
- Kuksa, N. V. (2002b). Scientific «experiments by Gnat Yakovych Stellets'kij to clarify hystorical mystery of Bohdan» in Subotiv (20th of XX cent.). *Arkheologichnyy litopys Livoberezhnoi Ukrainy*, (2), 156—159 (in Ukrainian).
- Kuksa, N. V. (2010). St. Elias Church in Subotiv: the main stages of restoration of the monument of architecture of the middle of the XVII century. In *Sivershina in the hystory of Ukraine* (Is. 3, pp. 31—35) (in Ukrainian).
- Kuksa, N. V., & Didenko, Ya. L. (2018). The Dnieper river region past. XVIII—XX centuries. Cherkasy: Vertykal, 300 p. (in Ukrainian).
- The Chronicle by Hadyach Colonel Grygorij Grabyanka. (1992). Kyiv: Znannya Ukrainy, 192 p. (in Ukrainian).
- Dzira, Ya. I. (ed.). (1971). *The Chronicle by Samovydets*. Kyiv: Naukova Dumka, 208 p. (in Ukrainian).
- Logvyn, G. (1954). *Chygyryn. Subotiv: architectural and historical study*. Kyiv, 72 p. (in Ukrainian).
- Novyk, M. (2006). Funeral circumstances and location of Bogdan Khmelnytsky's tomb. *Hystorical and geographical studies in Ukraine*, 9, 204—210 (in Ukrainian).
- On the issue of treasury allowance for the construction of a church in Subbotovka village. (1868). The State Achieves of Kyiv reion, fond 17, folder 1, file 375. Kyiv, Ukraine (in Russian).
- On the recall of the Kiev Metropolitan on reconstruction and keeping of the church in Subbotivka village to preserve its antiquity. (1862—1863). The Central State Historical Achieves of Ukraine, fond 442, folder 295, file 5. Kyiv, Ukraine (in Russian).
- Slukin, V. M. (1991). *Architectural and hystorical underground stuctures (typology, function, genesis)*. Sverdlovsk, 236 p. (in Russian).
- Smolij, V. A., & Stepankov, V. S. (2009). Bohdan Khmelnytsky (Socio-political portrait). Kyiv: Tempora, 679 p. (in Ukrainian).
- Strilenko, Yu., & Kalashnyk, Yu. (2006). *17th Century Architectural Monument the Church of Saint Elias in the village of Subotiv in Cherkasy region. Conservation No. 777. Report on the technological examination of the materials and constructions of the church. Recommendations on the technology of work execution*. Cherkasy, 19 p. (in Ukrainian).
- Tatarov, A. (1888). *Metric for obtaining true information about the ancient Orthodox churches of God, buildings and art objects. Subbotovo vilage of the Chigirinsky district of the Kiev province*. Manuscript archive in the Institute for the History of Material Culture of the Russian Academy of Sciences, fond P-III, file 2278. Saint Petersburg, Russian Federation (in Russian).
- Khomenko, R., Bondar, K., & Popov, S. (2013). New high-resolution shallow-depth multi-electrode equipment for electrical resistivity tomography). *Visnyk Kyivskogo Universytetu. Geologiya*, (2), 36—40 (in Ukrainian).
- Chernihiv Chronicle on the new writing (1587—1725) and Kolomak petitions with the introduction article by A. Lazarevskij. (1890). Kiev, 43 p. (in Russian).
- Shevchenko, N. P., & Novyk, M. M. (2006). *Report on the work of the Right-bank archaeological expedition in 2005-2006*. Archive of the Institute of Archaeology of the NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Yura, R. O. (1970). *Report on the work of the Slavic Expedition of the Institute of Archeology of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR in the village of Subotov, Chyhyryn district of*

- Cherkasy region in 1970*. Archive of the Institute of Archaeology of the NAS of Ukraine (in Ukrainian).
- Yurchenko, S. Yu. (2015). Restoration of the Church of St. Elias in Subotiv in the middle of the XIXth century in the language of documents. In *Proceedings of the Center for Monuments* (Vol. 27, pp. 33³/449). http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pcp_2015_27_5 (in Ukrainian).
- Barilaro, D., Branca, C., Gresta, S., Imposa, S., Leone, A., & Majolino, D. (2007). Case study. Ground penetrating radar (G.P.R.) surveys applied to the research of crypts in San Sebastiano's church in Catania (Sicily). *Journal of Cultural Heritage*, 8(1), 73—76. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2006.10.003>.
- Gawroński, F. (1903). Wycieczki historyczno-archeologiczne po Ukrainie: Wiszenki, Borowica, Czechryń, Subotiw. *Studia i szkice historyczne. Ser. 1, 1*, 263—269.
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR Remote Sensing in Archaeology*. Springer, 233 p.
- Chernov, A., Dziubacki, D., Cogoni, M., & Bădescu, A. (2018). First conclusions about results of GPR investigations in the Church of the Assumption of the Blessed Virgin Mary in Kłodzko, Poland. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 7(1), 123—128. <https://doi.org/10.5194/gi-7-123-2018>.
- Conyers, L. B. (2017). Ground-penetrating Radar. In: A. Gilbert (Ed.), *Encyclopedia of Geoarchaeology* (pp. 367—379). Heidelberg, London, New York: Springer.
- Ivashchuk, V., Borodavka, V., Prokhorenko, V., Chu Xin, & Pavluk, A. (2019). *Synchro 3. Ver. 3.11.1.5*. Retrieved from http://viy.ua/download/install_VIY_SGPR.zip.
- Loke, M. H. (2009). *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys*. 144 p.
- Loke, M. H., & Barker, R. D. (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, 131—152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>.
- Panisova, J., Murín, I., Paštka, R., Haličková, J., Brunčák, P., Pohánka, V., Papčo, J., & Milo, P. (2016). Geophysical fingerprints of shallow cultural structures from microgravity and GPR measurements in the Church of St. George, Svätý Jur, Slovakia. *Journal of Applied Geophysics*, 127, 102—111. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.02.009>.
- Warren, C., Giannopoulos, A., & Giannakis, I. (2016). GprMax: Open source software to simulate electromagnetic wave propagation for Ground Penetrating Radar. *Computer Physics Communications*, 209, 163—170. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2016.08.020>.

Результати георадарного обстеження Іллінської церкви — усипальні Богдана Хмельницького в Субботові

К. М. Бондарь, Р. В. Хоменко, А. П. Чернов, Н. В. Кукса, 2020

¹Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна

²Національний історико-культурний заповідник «Чигирин»,
Черкаська обл., Україна

Археолого-геофізичні дослідження в Іллінській церкві в Субботові (Черкаська обл., Україна) проведені в зв'язку з критичним переглядом історичного міфу, що існує навколо цієї пам'ятки, відомої як усипальниця Богдана Хмельницького, Гетьмана Війська Запорізького і фундатора Української держави. Метою робіт був пошук прихованих конструкцій в стінах і під підлогою церкви. Під час досліджень було проведено георадарне знімання, якому передувала ретельний аналіз історичних та археологічних джерел, а після геофізичні аномалії були зафіксовані бурінням. В рамках перевірки правильності інтерпретації геофізичної інформації було

виконано чисельне моделювання георадарних даних. Вимірювання виконані за допомогою георадарів серії VIY-3 з робочими частотами 300 і 500 МГц по підлозі наві і по стінах південно-західного кута церкви. У центральній частині церкви, на глибинах 2,4 і 4,0 м ідентифіковані аномалії від склепіння і підлоги підземної споруди, витягнутої вздовж вісі схід-захід, і, ймовірно, майже повністю засипаної ґрунтом. Буріння аномалії підтвердило наявність зони розуцільнення, яка відповідає засипці підземелля. Синтетичні радарограми, розраховані за допомогою програми GprMax з використанням геометричних параметрів об'єкта, отриманих в результаті інтерпретації георадарних даних, і фізичних властивостей ґрунтів, виміряними незалежними методами, відповідають реально спостереженим. У стінах південно-західного кута значних порожнин георадарним методом не виявлено. З огляду на неспроможність літописної версії про сплюндрування могили Б. Хмельницького польсько-шляхетськими військами в 1664 р, споруда може виявитись його склепом-усипальницею, відомості про яку наяві у письмових історичних джерелах.

Ключові слова: георадар, Іллінська церква, підземна споруда, Богдан Хмельницький, діелектрична проникність, суглинок