

УДК 624.131

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-54-62

ГРАФ ОБРАБОТКИ ПРИ ГЕОРАДАРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ АНТРОПОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

Д.В. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. **Ю.Г. МОСКАЛЬКОВА**, **И.В. ГОМЕЛЮК**
(Белорусско-Российский университет, Могилев)
ORCID <https://orcid.org/0000-0003-3293-8880>, <https://orcid.org/0000-0002-4107-2452>,
<https://orcid.org/0000-0001-9240-566X>

В статье приведен обзор развития георадарных исследований: хотя теоретические основы георадарного метода заложены достаточно давно, практически реализовать данный метод стало возможно только в последние годы. Поскольку изменение диэлектрической проницаемости зависит от большого количества факторов, на сегодняшний день возникают сложности с установлением корректности полученных георадарных данных. Целью настоящего исследования являлась разработка эффективного графа обработки и интерпретация георадарных профилей, полученных на основе геофизических изысканий на урбанизированных территориях. Район исследования расположен на правом берегу реки Днепр в г. Могилеве (Республика Беларусь), где ранее, согласно архивным данным, были расположены жилые кварталы. Разработанный граф обработки основан на комбинации следующих методов: усиление отдельных сигналов, метод вычитания среднего, полосовой фильтр. С применением предложенного графа обработки на основе данных о диэлектрической проницаемости получена информация о форме и глубине залегания объектов искусственной природы, погребенных в культурном слое.

Ключевые слова: георадар, георадарный профиль, граф обработки, интерпретация, археология, инженерно-геофизические изыскания.

Введение. Геофизические изыскания, в частности, с применением георадара, в последнее время стали важной частью археологических исследований [1; 2]. В археологии изыскания обычно проводятся в местах предполагаемой деятельности человека, т.е. на местах расположения городищ, кварталов городской застройки и т.п., поскольку в таких местах наиболее высока вероятность обнаружения исторически значимых находок. Такие находки всегда имеют искусственную природу и по физическим свойствам отличаются от вмещающих отложений. По этой причине эффективным является применение геофизических изысканий, которые относятся к неразрушающим методам, и их применение позволяет предварительно определить положение археологических объектов без проведения раскопок. Также к преимуществам геофизических изысканий можно отнести высокую скорость и относительно небольшую стоимость проводимых исследований.

Теоретические основы георадарных исследований были разработаны в начале XX века, однако в тот период времени не было практической возможности реализовать данный метод аппаратно. Достаточное развитие технологии получили в середине 80-х годов XX века [1]. Тем не менее повсеместное применение георадарный метод нашел только в последние 10 лет, когда стали широко распространены портативные устройства для получения, обработки и хранения информации. Ввиду указанных обстоятельств накоплен относительно небольшой опыт использования данного метода, и на сегодняшний день интерпретация георадарных профилей все еще вызывает затруднения, что подтверждается также в работах [3–6]. В связи с этим актуальным является получение новых профилей и разработка предложений по их корректной обработке и интерпретации.

Для проведения исследования было выбрано место, расположенное на правом берегу реки Днепр в г. Могилеве (Республика Беларусь). Вблизи выбранного нами участка исследования расположен Свято-Никольский женский монастырь, основанный в XVII веке [10]. На планах города XVII – начала XX вв. на территории зоны исследования расположены жилые кварталы [11; 12]. Во время Второй мировой войны данный район был полностью разрушен. С 2015 г. началось благоустройство рассматриваемой территории, были проложены автомобильные проезды, пешеходные дорожки, ведется строительство парка¹. Георадарные исследования на этой территории не проводились, однако данная методика была удачно применена при исследованиях, имевших место на других аналогичных объектах [7–9]. Геофизические изыскания с использованием георадара позволяют выделить перспективные участки на георадарограммах и локализовать применение прямых археологических методов (раскопок). Данные изысканий должны быть обработаны и интерпретированы таким образом, чтобы получить следующую информацию: подтвердить наличие в антропогенном слое объектов искусственной природы (в частности, фундаментов зданий); предварительно определить форму, размеры и материал, из которого изготовлены найденные объекты; выявить их местоположение и глубину залегания.

Существует ряд традиционно используемых методов обработки и интерпретации результатов георадарных исследований. К георадарам разных модификаций прилагается пакет программного обеспечения, включающий набор рекомендуемых методов обработки данных. Как правило, для интерпретатора затруднительным является выбор оптимального сочетания нескольких последовательно применяемых методов для решения конкретной задачи. Необходимо учитывать следующие параметры, влияющие на результат: глубину залегания исследуемых объектов, влажность грунтов, диэлектрическую проницаемость среды, скорость и частоту исходящего сигнала, уточнение диапазона фильтруемых частот.

¹ Официальный сайт парка «Подниколье». URL: <http://mogilev.gov.by/podnikolie/>.

В представленном исследовании данные получены с использованием георадара ОКО-3 (производитель – ООО «Логические Системы», страна производства – Россия, год выпуска – 2018). Для указанного георадара рекомендуется использовать следующие методы обработки: метод вычитания среднего, удаление тренда, горизонтальная медианная фильтрация, реверсирование, выравнивание, выделение огибающей, горизонтальный фильтр, полосовой фильтр, метод синтеза апертуры, обратная фильтрация, деконволюция, преобразование Гилберта и др. В процессе обработки при использовании каждого метода варьируются численные значения используемых фильтров. Для получения корректных результатов необходимо выбрать такое сочетание методов обработки, которое позволит при последующей интерпретации данных получить наиболее полное представление об исследуемых объектах.

Таким образом, предметом исследования являются выбор оптимального сочетания методов обработки и последующая интерпретация антропогенного слоя на георадарных профилях, полученных с использованием георадара ОКО-3.

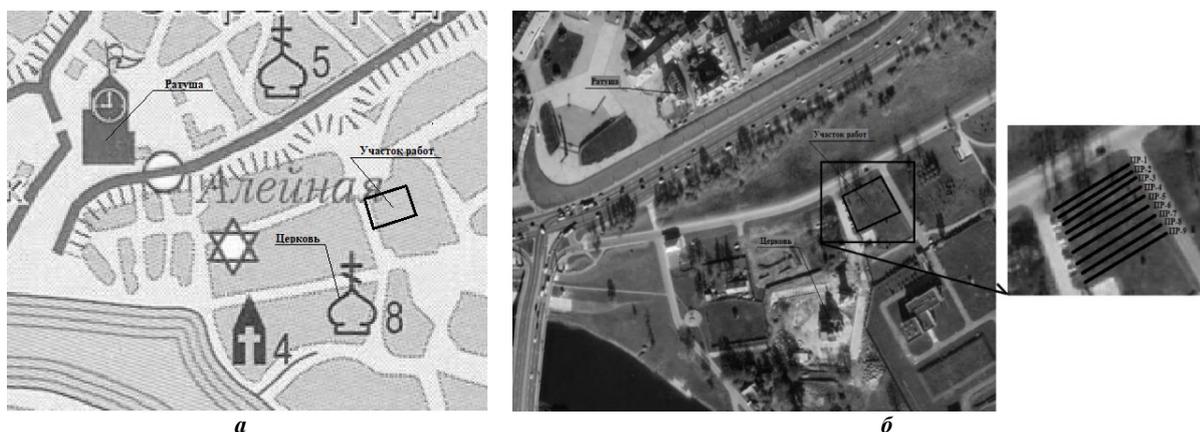
Цель исследования – провести геофизические изыскания на урбанизированных территориях и предложить эффективный граф обработки георадарных профилей, который позволит выявить остатки фундаментов зданий и другие включения искусственной природы в антропогенном слое.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи: изучена архивная информация для выбора участка исследования, сделана разбивка профилей на выбранном участке, проведены георадарные исследования с получением фактического материала, разработан граф обработки георадарограмм и выполнена интерпретация полученных данных.

Основная часть. Исследования проводились в ноябре 2021 года. Рельеф площадки ровный, искусственно сформирован при строительном освоении территории, в результате которого были затронуты только поверхностные слои грунта.

Результативность в проведении такого типа исследований во многом зависит от полноты и надлежащего изучения исторической информации, поэтому перед проведением работ были проанализированы архивные материалы и исторические источники² [7; 8]. Итогом анализа стало получение данных о расположении в этом районе города бывшей застройки, которая в настоящее время разрушена (рисунок 1, а).

Участок работ (рисунок 1, б) был выбран согласно архивным данным как наиболее перспективный для проведения исследования. Расположенные рядом с участком Свято-Покровская церковь, построенная на фундаменте церкви XVII века, и ратуша, возведенная в 2008 г. на месте ее исторического положения, позволили с высокой точностью привязать место проведения исследования к историческому плану города [13]. На данной территории на протяжении XV–XX вв. городская застройка подвергалась неоднократному разрушению и последующему восстановлению. В результате образовался культурный слой мощностью до 4,5 м, в котором содержится большое количество антропогенных объектов, таких как остатки фундаментов, коммуникаций, мостовых. В связи с вышеизложенным при обработке и интерпретации полученных данных особое внимание уделялось объектам искусственной природы.



а – на карте XVII века; б – на современной карте

Рисунок 1. – Положение зоны исследования

Для проведения исследования был применен метод неглубокой геофизической съемки с использованием радиотехнического прибора подповерхностного зондирования – георадара. Георадарный метод исследования основан на явлении отражения электромагнитных волн от границ раздела сред, на которых меняются электрические свойства. Принцип работы георадара состоит в излучении сверхкороткого высокочастотного электромагнитного импульса и приеме отраженных сигналов. Основным параметром изучаемой среды является ее диэлектрическая проницаемость (ϵ). Отражение электромагнитного импульса происходит на границах изменения диэлектрической

² Шляхі магілеўскай гісторыі : зб. нав. ст. удзельнікаў IV Міжнар. навук. канф. «Гісторыя Магілева: мінулае і сучаснасць» / Уклад. І.А. Пушкін, В.В. Юдзін. – Магілёў : Могилевская областная укрупненная типография, 2005. – 488 с.

проницаемости исследуемой среды либо на включенных в эту среду неоднородностях, связанных с наличием природных или антропогенных объектов. Наиболее важными характеристиками для георадарных исследований являются глубина зондирования и разрешающая способность по глубине [1; 14]. Методика георадарных исследований зависит от особенностей целевых объектов и условий исследуемой территории.

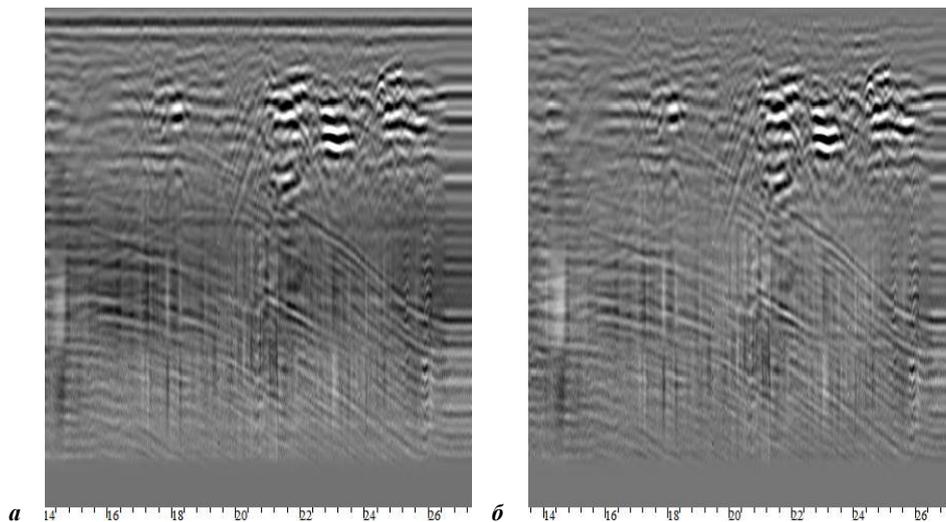
В рамках представленного исследования был применен георадар ОКО-3 с антенной АБ-150, предназначенный для обнаружения различных объектов (в том числе неметаллических). Данный прибор имеет антенный блок на 150 МГц, что позволяет проводить исследования на глубине до 12 м, и разрешающую способность 0,35 м в зависимости от состава грунта. При изысканиях были выбраны следующие параметры: количество точек – 511, датчик перемещения – ДП-32У, режим съемки непрерывный [15; 16].

Для оптимального изучения территории исследования на участке было проложено 9 профилей – от ПР-1 до ПР-9, – каждый длиной 20 м (рисунок 2). Профили располагались параллельно. Общая площадь участка исследований составила 380 м².

Обработка снятых георадарных профилей проводилась по одинаковой схеме посредством программного обеспечения GeoScan и CartScan. Поправки на рельеф не вносились, так как перепад высот на профилях незначителен (в пределах 1 м).

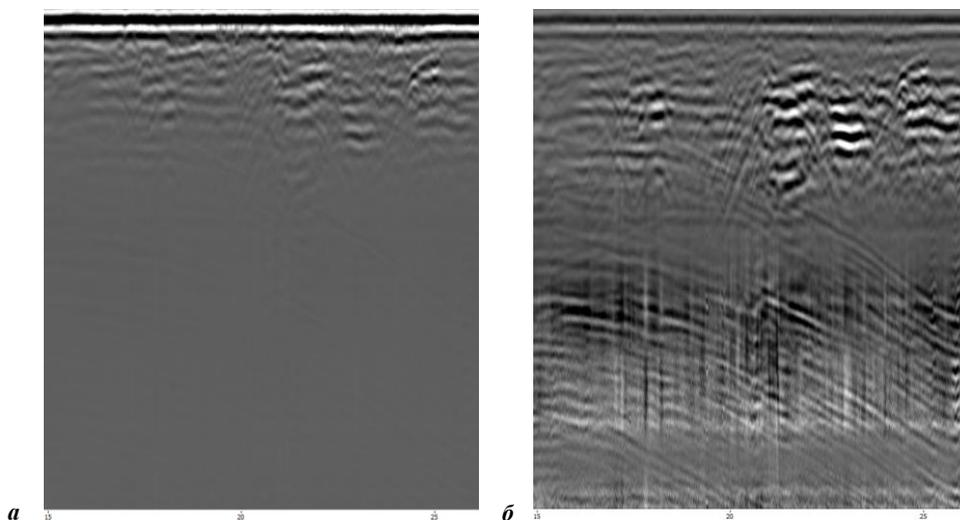
На начальном этапе обработки для улучшения наглядности и возможностей интерпретации были скорректированы определенные сигналы (рисунок 3). Усиление сигналов выполнялось в тех каналах, в которых согласно георадарограммам наблюдались волновые возмущения. Опорные точки подбирались таким образом, чтобы в результате усиления сигнала в области отображения радарограммы волновая картина была более явно выраженной.

Для уменьшения шумов, помех и отраженного сигнала был выбран метод вычитания среднего (см. рисунок 2), который был реализован в скользящем окне таким образом, чтобы были ослаблены высокоамплитудные и усилены низкоамплитудные сигналы при заданном горизонтальном размере окна 50 трасс [1].



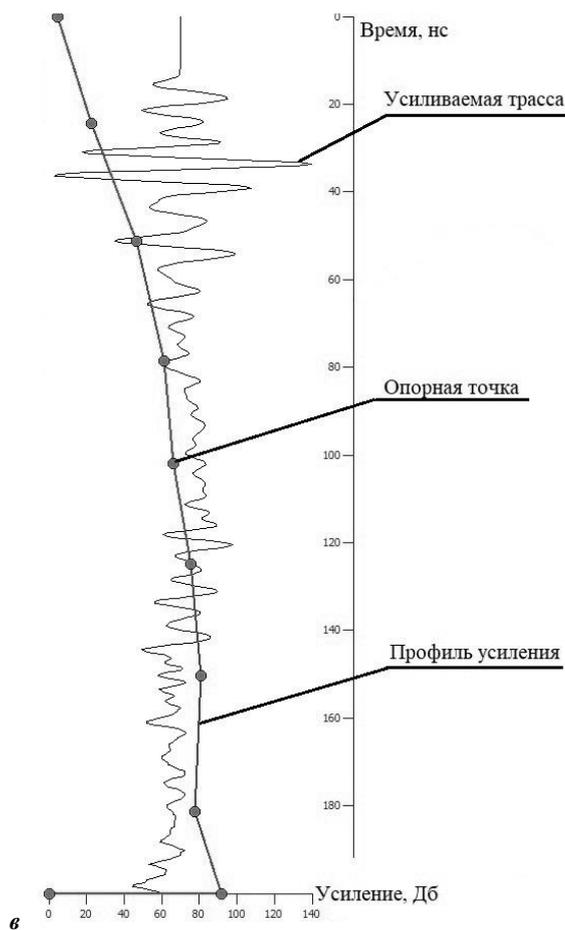
a – до вычитания; *б* – после вычитания

Рисунок 2. – Метод вычитания среднего



a – до усиления; *б* – после усиления

Рисунок 3. – Усиление сигнала (начало)



в – профиль усиления

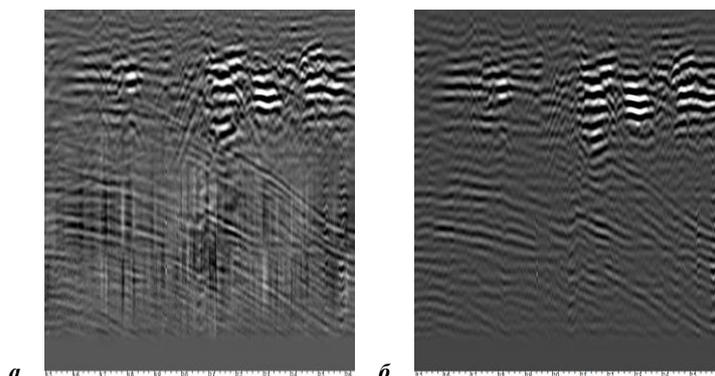
Рисунок 3. – Усиление сигнала (окончание)

Для фильтрации георадарограмм достаточно использовать простые типы линейных граничных и полосовых фильтров с трапециевидной формой амплитудно-частотных характеристик (рисунок 4). Подобные фильтры достаточно точны, чтобы ослабить шум без искажения полезного сигнала от объектов, находящихся в антропогенном слое. В основе методов фильтрации лежит прямое и обратное преобразование Фурье [17]. Для оптимизации соотношения сигнал/шум был выбран полосовой фильтр, который позволил подавить низкочастотные кратные волны и высокочастотные шумы. Параметры фильтра были взяты исходя из анализа спектра сигнала, в результате чего примененный диапазон составил от 0,08 до 0,16 ГГц.

Значения параметров обработки сведены в таблицу 1.

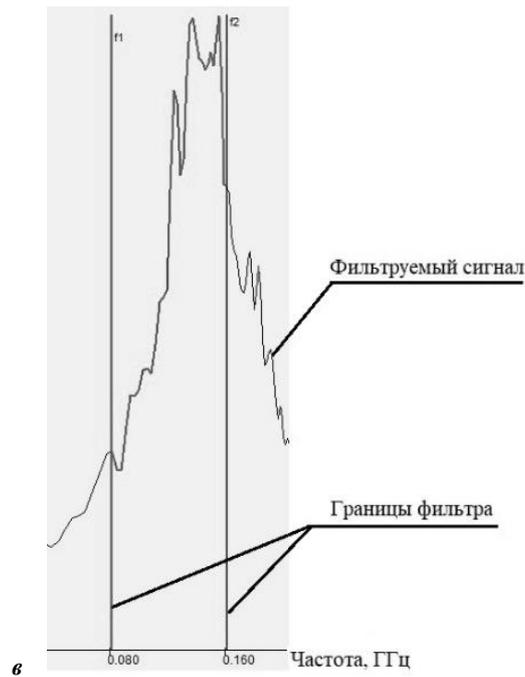
Таблица 1. – Параметры обработки

Метод обработки	Параметры обработки
Усиление сигнала	до 93 децибел
Метод вычитания среднего	50 трасс
Полосовой фильтр	от 0,08 до 0,16 ГГц



а – до применения фильтра; б – после применения фильтра

Рисунок 4. – Полосовой фильтр (начало)



ϵ – границы фильтра

Рисунок 4. – Полосовой фильтр (окончание)

В результате интерпретации данных, полученных при исследовании, установлено, что грунтовая толща в пределах исследуемого участка состоит из трех инженерно-геологических элементов (ИГЭ) (рисунок 5) [18; 19].

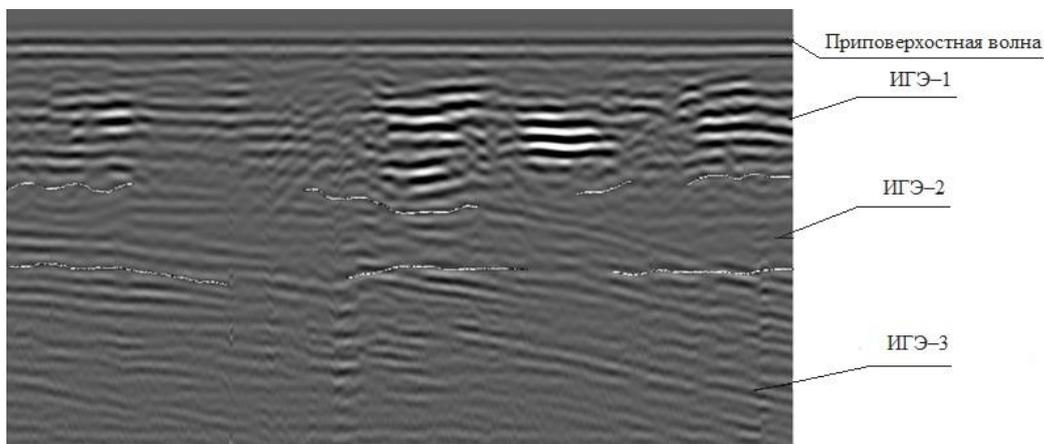


Рисунок 5. – Положение инженерно-геологических элементов на разрезе

Для расчета глубины залегания обнаруженных объектов и интерпретации данных использовались полученные значения диэлектрической проницаемости инженерно-геологических элементов и антропогенных объектов, приведенные в таблице 2.

Таблица 2. – Полученные значения относительной диэлектрической проницаемости и определенные по ним вид грунта и материал объекта

Определяемый элемент или объект	Полученные показатели относительной диэлектрической проницаемости, ϵ	Вид грунта или материала
Инженерно-геологические элементы		
ИГЭ-1	5,4	Антропогенные отложения (культурный слой)
ИГЭ-2	14,3	Песчаный водонасыщенный грунт
ИГЭ-3	5,7	Суглинок или супесь
Антропогенные объекты		
Объект 1	8,4	Древесина
Объект 2	2,6	Кирпич
Объект 3	5,8	Бетон

В верхней части разреза до глубины 4,5 м (ИГЭ-1) представлены антропогенные отложения с включениями объектов искусственного происхождения (предположительно остатки старых фундаментов и т.п.). На некоторых профилях в приповерхностной части прослеживаются уплотненные слои, связанные с планировкой территории.

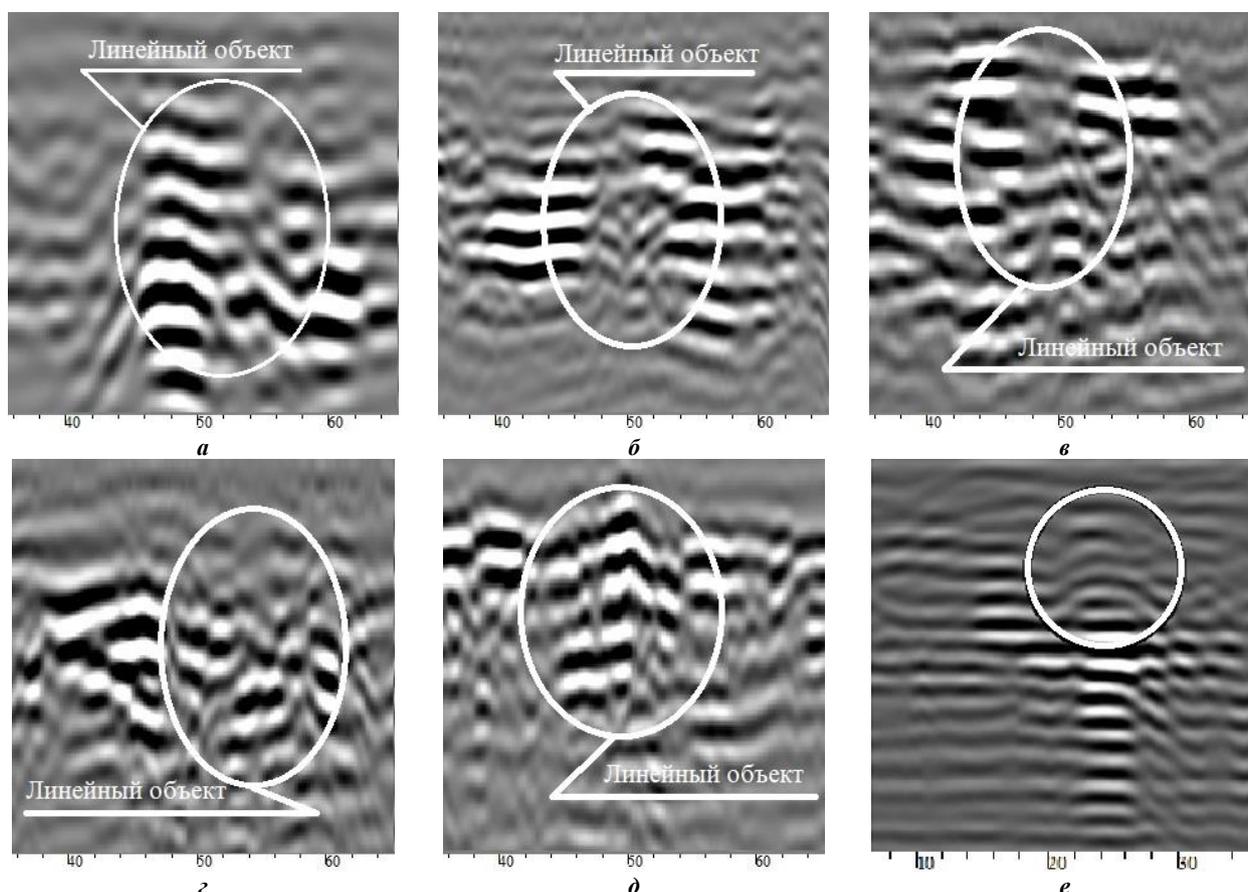
Ниже этой толщи с явным несогласием в залегании располагается слой грунта на глубине от 4,5 до 6,5 м (ИГЭ-2) с высокой диэлектрической проницаемостью ($\epsilon = 14,3$). Диэлектрическая проницаемость указанной части отложений соответствует водонасыщенным грунтам, т.е. ИГЭ-2 является песчаными водонасыщенными отложениями с выраженной слоистостью. Наличие воды можно объяснить близким расположением реки и ее влиянием на близлежащие территории.

В нижней части разреза выделяется инженерно-геологический элемент (ИГЭ-3), характеризующийся однородным залеганием грунта. По параметрам диэлектрической проницаемости этот слой соответствует суглинистым или супесчаным отложениям ($\epsilon = 5,7$).

Несмотря на близость расположения склона и возможность искажений данных из-за его наличия, влияния на результаты исследования отмечено не было.

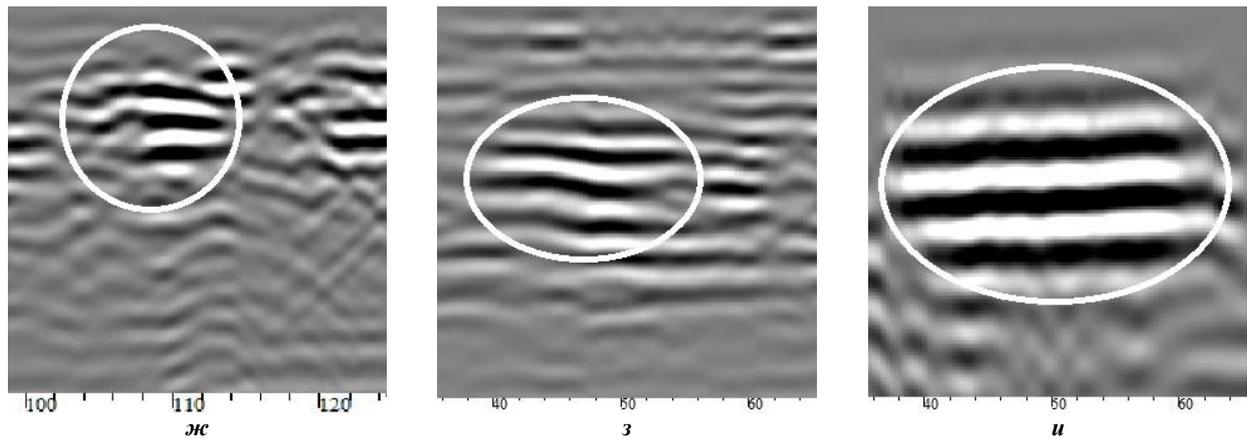
Интерпретация георадарных профилей позволила выделить несколько объектов, идентифицируемых как антропогенные и представляющих интерес для последующих археологических изысканий: на профилях ПР-1–ПР-5 в пикетах 40–60 на глубине 1,3–1,8 м выделяется линейный объект, предположительно являющийся остатками фундамента (рисунки 6, а–д); на профиле ПР-1 в пикетах 10–15 явно выделяется объект, расположенный на глубине 2,2 м, отличающийся повышенными отражающими свойствами и, вероятно, имеющий металлическую природу (рисунок 6, е).

Также на профилях ПР-5, ПР-7, ПР-8 обнаружено несколько объектов, природу которых не удалось идентифицировать. Эти объекты явно визуализируются на георадарограммах (рисунок 6, ж–и), но конфигурация объектов не позволяет их идентифицировать, и при этом для них не удалось установить значения диэлектрической проницаемости, т.к. при определении диэлектрической проницаемости программными методами необходимо построение гиперболы по дифрагированной волне. Для указанных объектов на профилях ПР-5, ПР-7, ПР-8 дифрагированная волна отсутствует. Повторное прохождение над данными объектами дало аналогичные георадарограммы и не обеспечило получение дополнительной информации. Чтобы определить природу подобных объектов, необходимо использовать прямые методы исследования (например, археологические раскопки).



а – профиль ПР-1, пикеты 40–60; б – профиль ПР-2, пикеты 40–60; в – профиль ПР-3, пикеты 40–60;
г – профиль ПР-4, пикеты 40–60; д – профиль ПР-5, пикеты 40–60; е – профиль ПР-1, пикеты 10–15;

Рисунок 6. – Фрагмент профилей (начало)



ж – профиль ПР-5, пикеты 100-120; з – профиль ПР-7, пикеты 40–60; и – профиль ПР-8, пикеты 40–60

Рисунок 6. – Фрагмент профилей (окончание)

Таким образом, на основании проведенных инженерно-геофизических исследований удалось выделить предположительное положение остатков фундаментов, а также выявить ряд объектов, требующих дальнейшей детализации и изучения с помощью прямых археологических методов. Существует вероятность, что данные объекты могут иметь некоторую ценность (например, историческую), и возможность их обнаружения неразрушающими методами позволит существенно облегчить проведение археологических раскопок.

Заключение. Были проведены инженерно-геофизические исследования на месте предполагаемого жилого квартала XVII – начала XX вв. Метод неглубокой геофизической съемки с использованием георадара помог получить информацию об объектах культурного слоя. В результате исследований было выполнено следующее.

1. Разработана комбинация методов обработки полученных георадарных данных (граф обработки), включающий усиление определенных сигналов, метод вычитания среднего, фильтрацию с использованием простых типов линейных граничных и полосовых фильтров.

2. Разработанный граф позволяет обрабатывать георадарограммы антропогенных отложений с наличием в них объектов искусственной природы. По результатам применения разработанного графа обработки данных с его последующей интерпретацией была выполнена разбивка разреза на инженерно-геологические элементы, выявлены особенности этих элементов, определена их диэлектрическая проницаемость. Установлено, что близкое расположение реки по отношению к исследуемому объектам оказывает влияние на георадарные профили: по результатам изысканий диэлектрическая проницаемость части отложений соответствует водонасыщенным грунтам.

3. При интерпретации георадарограмм на основании данных о диэлектрической проницаемости объектов в антропогенном слое выделены объекты (в данном случае предположительно фундаменты разрушенных зданий, фрагменты металлических изделий), подходящие для дальнейшего изучения археологическими методами.

4. Некоторые объекты на георадарограммах не были идентифицированы ввиду недостаточности данных об их природе. Подобные объекты требуют дополнительного изучения с детализацией геофизических данных или проверки другими методами, включая археологические раскопки. Это обуславливает дальнейшее развитие исследований по данной теме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию : учеб. пособие / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М. : МГУ, 2004. – 153 с.
2. Application of magnetometry, georadar (GPR) and geoelectrical methods in archaeo-geophysical investigation of a Napoleonic battlefield with fortification at Pressburg (Bratislava, Slovakia) / I. Murín [et al.] // J. of Applied Geophysics. – 2022. – Vol. 196. – 12 p. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104493.
3. Старовойтов, А.В. Интерпретация георадиолокационных данных : учеб. пособие / А.В. Старовойтов. – М. : МГУ, 2008. – 192 с.
4. Бондар, К.М. Вивчення ефективності георадарних досліджень на території Національного заповідника «Софія Київська» для вирішення археологічних завдань / К.М. Бондар, Т.А. Бобровський, І.В. Цюпа // Геоінформатика. – 2016. – № 4. – С. 75–82.
5. ERT and GPR Prospecting Applied to Unsaturated and Subwater Analogue Archaeological Site in a Full Scale Laboratory / L. Carozzoli [et al.] // Applied Sciences. – 2022. – Vol. 12, № 3. – 26 p. DOI: 10.3390/app12031126.
6. Ibraheem, I.M. Archaeogeophysical exploration in Neuss-Norf, Germany using electrical resistivity tomography and magnetic data / I.M. Ibraheem, R. Bergers, B. Tezkan // Near Surface Geophysics. – 2021. – Vol. 19, № 1. – P. 603–623. DOI: 10.1002/nsg.12172.
7. Могилевская губерния: государственные, религиозные и общественные учреждения (1772–1917) / Е.К. Анищенко [и др.] ; сост. Ю.Н. Снапковский, Д.Л. Яцкевич ; редкол.: Д.В. Ялевич (гл. ред.) [и др.]. – Минск : Беларусь, 2014. – 814 с.
8. Курков, И.Н. Могилевщина. Легенды, события, люди : моногр. / И.Н. Курков, И.А. Пушкин. – 2-е изд., доп. и перераб. – Минск : Медиафакт, 2008. – 367 с.
9. Галковский, Т.В. Комплексное применение георадарной и магнитной съемки в инженерных изысканиях на объектах социальной инфраструктуры и в археологических исследованиях / Т.В. Галковский, Г.А. Аронов // Инженерная сейсмозащита и сейсмология-2020. Георадар-2020. Теперь вместе : сб. тез. науч.-практ. конф. / Под ред. М.С. Судаковой, М.Р. Садуртдинова. – М. : Изд. дом «Академия естествознания», 2020. – С. 105–109.

10. Результаты исследования геофизическими методами археологического памятника бронзового века городище Андреевское (Южный Урал) / В.В. Носкевич [и др.] // Уральский геофизический вестник. – 2014. – № 1 (23). – С. 72–80.
11. Identification of buried historical mineshaft using ground-penetrating radar / Z. Pilecki [et al.] // Engineering Geology. – 2021. – Vol. 294, № 2. – 13 p. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106400.
12. Результаты георадарного обследования Ильинской церкви – усыпальницы Богдана Хмельницкого в Субботове / К.М. Бондарь [и др.] // Геофизический журнал. – 2020. – Т. 42, № 3. – С. 173–194.
13. Хомяков, В.Г. Развитие базы туристско-экскурсионной деятельности в Беларуси на рубеже XX–XXI столетий / В.Г. Хомяков, Е.А. Василенко // Весн. Магілёўскага дзярж. ун-та імя А.А. Куляшова. Сер. Д, Эканоміка, сацыялогія, права. – 2015. – № 1 (45). – С. 56–62.
14. Лукин, А.С. Введение в цифровую обработку сигналов (математические основы) : учеб. пособие / А.С. Лукин. – М. : МГУ, 2007. – 54 с.
15. Павлова, В.Ю. Опыт работы с прибором георадар «ОКО-250» для уточнения грунтовых условий на озерновской косе Культурного озера (город Петропавловск-Камчатский) / В.Ю. Павлова, В.А. Соловьев, А.С. Кокорева // Вестн. КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. – 2021. – Т. 35, № 2. – С. 110–119.
16. Эффективность технического обследования с применением георадара / Б.Б. Кульбаев [и др.] // Вестн. АО «КазНИИСА». – 2020. – № 3. – С. 50–61.
17. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб. : Питер, 2003. – 608 с.
18. High-resolution reflection seismics reveal the structure and the evolution of the Quaternary glacial Tannwald Basin / T. Burschil [et al.] // Near Surface Geophysics. – 2018. – Vol. 16, № 6. – P. 593–610. DOI: 10.1002/nsg.12011.
19. Финкельштейн, М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А. Кутев, В.П. Золотарев. – М. : Недра, 1986. – 128 с.

REFERENCES

1. Vladov, M.L. & Starovoitov, A.V. (2004). *Vvedenie v georadiolokatsiyu*. Moscow: MGU. (In Russ.).
2. Murin, I., Neumann, M., Brady, C., Batora, J., Capo, M. & Drozd, D. (2022). Application of magnetometry, georadar (GPR) and geoelectrical methods in archaeo-geophysical investigation of a Napoleonic battlefield with fortification at Pressburg (Bratislava, Slovakia). *J. of Applied Geophysics*, 196. 12. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2021.104493.
3. Starovoitov, A.V. *Interpretatsiya georadiolokatsionnykh dannykh*. Moscow: MGU. (In Russ.).
4. Bondar, K.M., Bobrovskii, T.A. & Tsyupa, I.V. (2016). Vivchennya efektyvnosti georadarnikh doslidzhen' na teritorii Natsional'nogo zapovidnika «Sofiya Kiivs'ka» dlya virishennya arkeologichnykh zavdan' [Efficiency of GPR survey for archaeological targets detection in the national conservation area of “St. Sophia of Kyiv”]. *Geoinformatika*, (4), 75–82. (In Ukr., abstr. in Engl.).
5. Capozzoli, L., Giampaolo, V., De Martino, G., Perciante, F., Lapenna, V. & Rizzo, E. (2022). ERT and GPR Prospecting Applied to Unsaturated and Subwater Analogue Archaeological Site in a Full Scale Laboratory. *Applied Sciences*, 12 (3), 26. DOI: 10.3390/app12031126.
6. Ibraheem, I.M., Bergers, R. & Tezkan, B. (2021). Archaeogeophysical exploration in Neuss-Norf, Germany using electrical resistivity tomography and magnetic data. *Near Surface Geophysics*, 19 (1), 603–623. DOI: 10.1002/nsg.12172.
7. Anishchenko, E.K., Antonovich, Z.V., Vrublevskii, V.V., Kotik, T.N., Leont'eva, T.E., Lipskaya, L.M., ... Yatskevich, D.L. (2014). *Mogilevskaya guberniya: gosudarstvennye, religioznye i obshchestvennye uchrezhdeniya (1772–1917)*. Minsk: Belarus. (In Russ.).
8. Kurkov, I.N. & Pushkin, I.A. (2008). *Mogilevshchina. Legendy, sobytiya, lyudi*. Minsk: Mediafakt. (In Russ.).
9. Galkovskii, T.V. & Aronov, G.A. (2020). Kompleksnoe primeneniye georadarnoi i magnitnoi "emki v inzhenernykh izyskaniyakh na ob"ektakh sotsial'noi infrastruktury i v arkeologicheskikh issledovaniyakh [Complex application of georadar and magnetic survey in engineered surveys at objects of social infrastructure and archaeological studies]. In M.S. Sudakova (Eds.) & M.R. Sadurtdinov (Eds.) *Inzhenernaya seismorazvedka i seismologiya-2020. Georadar-2020. Teper' vmeste: sb. tez. nauch.-prakt. konf. (105–109)*. Moscow: Izd. dom “Akademiya Estestvoznaniya”. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Noskevich, V.V., Fedorova, N.V., Bebnov, A.S., Vdovin, A.G. & Mekhonoshina, T.L. (2014). Rezul'taty issledovaniya geofizicheskimi metodami arkeologicheskogo pamyatnika bronзового века gorodishche Andreevskoe (Yuzhnyi Ural) [Results of the geophysical research of bronze age archaeological monuments Andreevskoe (Southern Ural mountains)]. *Ural'skii geofizicheskii vestnik*, (1), 72–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Pilecki, Z., Krawiec, K., Pilecka, E., Kotyrba, A., Tomecka-Suchon, S. & Latka, T. (2021). Identification of buried historical mineshaft using ground-penetrating radar. *Engineering Geology*, 294 (2), 13. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106400.
12. Bondar, K.M., Khomenko, R.V., Chernov, A.P. & Kuksa, N.V. (2020). Rezul'taty georadarnogo obsledovaniya Il'inskoi tserkvi – usypal'nitsy Bogdana Khmel'nitskogo v Subbotove [Results of the ground penetrating radar survey in the church of St. Elias – Bohdan Khmelnytsky burial vault in Subotiv]. *Geofizicheskii zhurnal*, 42 (3), 173–194. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v42i3.2020.204709.
13. Khomyakov, V.G. & Vasilenko, E.A. (2015). Razvitie bazy turistsko-ekskursionnoi deyatelnosti v Belarusi na rubezhe XX–XXI stoletii [Development of tourism in Belarus at the turn of the XX–XXI centuries]. *Vesn. Magilevskaya dzharzh. un-ta imya A.A. Kulyashova. Ser. D, Ekanomika, satsyialogiya, prava [Mogilev State A. Kuleshov Bulletin. Ser. D, Economics. Sociology. Law]*, (1), 56–62. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Lukin, A.S. (2007). *Vvedenie v tsifrovuyu obrabotku signalov (matematicheskie osnovy)*. Moscow: MSU. (In Russ.).
15. Pavlova, V.Yu., Solov'ev, V.A. & Kokoreva, A.S. (2021). Opyt raboty s priborom georadar «OKO-250» dlya utochneniya gruntovykh uslovii na ozernovskoi kose Kulturnogo ozera (gorod Petropavlovsk-Kamchatskii) [Features of operating the instrument georadar "OKO-250" for refining the ground conditions on the ozernovskaya kosa Kulturnogo lake (Petropavlovsk-Kamchatsky city)]. *Vestn. KRAUNTs. Fiz.-mat. nauki [Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences]*, 35 (2), 110–119. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-110-119.
16. Kul'baev, B.B., Khomyakov, V.A., Zhamek, N.A. & Shokbarov, A.M. (2020). Effektivnost' tekhnicheskogo obsledovaniya s primeneniye georadara. *Vestn. AO "KazNIISA"*, (3), 50–61. (In Russ.).
17. Sergienko, A.B. (2003). *Tsifrovaya obrabotka signalov*. St. Petersburg: Piter. (In Russ.).

18. Burschil, T., Bunes, H., Tanner, D.C., Wielandt-Schuster, U., Ellwanger, D. & Gabriel, G. (2018). High-resolution reflection seismics reveal the structure and the evolution of the Quaternary glacial Tannwald Basin. *Near Surface Geophysics*, 16 (6), 593–610. DOI: 10.1002/nsg.12011.
19. Finkel'shtein, M.I., Kutev, V.A. & Zolotarev, V.P. (1986). *Primenenie radiolokatsionnogo podpoverkhnostnogo zondirovaniya v inzhenernoi geologii*. Moscow: Nedra. (In Russ.).

Поступила 08.04.2022

DATA PROCESSING SEQUENCE FOR GPR INVESTIGATION OF ANTHROPOGENIC SEDIMENTS IN URBANIZED AREAS

D. IVANOV, Y. MASKALKOVA, I. GOMELUK

The article presents a historical overview of the ground penetrating research (GPR) development. Although the theoretical foundations of the GPR method was formulated many years ago, it has been possible to practically implement this method only in recent years. Nowadays there are difficulties with GPR data analysis because the change in dielectric permittivity depends on a lot of factors. The aim of this study was to develop an effective GPR data processing sequence and interpretation of GPR profiles obtained on the basis of geophysical surveys in urbanized areas. The survey was conducted on the right bank of the Dnieper River in Mogilev (the Republic of Belarus), where previously residential quarters were located (according to architectural data). The developed GPR data processing sequence is based on a combination of the following methods: amplification of individual signals, the method of subtracting the average, a bandpass filter. The proposed data processing sequence is based on dielectric permeability. Information about the shape and depth of the objects buried in the cultural layer was obtained by using the proposed sequence.

Keywords: ground penetrating research, GPR profiles, data processing sequence, interpretation, archeology, engineering-geological survey.