

Санкт-Петербургский государственный университет

*ГИНГА Михаил Сергеевич*

**Выпускная квалификационная работа**

*Геофизические исследования территории музея заповедника «Прорыв  
Блокады Ленинграда»*

Уровень образования: магистратура

Направление 05.04.01 «Геология»

Основная образовательная программа ВМ.5796.2020 «Геофизика»

Научный руководитель: доцент  
кафедры геофизики СПбГУ  
кандидат физико-  
математических наук, Бобров  
Никита Юрьевич

Рецензент: младший научный  
сотрудник, отдел географии  
полярных стран. ААНИИ.  
Борисик Александр Львович

Санкт-Петербург  
2022

## Оглавление:

Введение.....	4
Основная часть.....	8
Глава 1. Невский пяточок .....	8
1.1. История плацдарма.....	8
1.2. Геофизические работы 2020-2022 года .....	12
Глава 2. Обзор поисковых методов военной археологии.....	13
2.1. Поиски с использованием металлоискателей .....	16
2.2. Магниторазведка.....	21
2.3. Георадиолокация.....	24
2.4. Сейсморазведка.....	31
Глава 3. Комплексные геофизические исследования. ....	33
3.1. Участок работ.....	33
3.2. Фотограмметрия.....	35
3.3. Металлодетектирование.....	38
3.4. Магниторазведка.....	40
3.5. Георадиолокация.....	49
3.6. Сейсморазведка.....	51
Глава 4. Интерпретация данных .....	54
4.1. Определение нормального геологического разреза; .....	54
4.2. Определение источников геофизических аномалий и оценка параметров аномалообразующих объектов на территории Невского пяточка. ....	59
4.3. Объект на акватории Невы .....	69
Заключение.....	74
Список использованной литературы .....	75

## **Аннотация**

Методы геофизики широко применимы как в инженерных изысканиях, так и в научных исследованиях, в том числе и в военной археологии. Данная работа посвящена поиску военно-исторических артефактов времён Великой Отечественной войны на плацдарме Невский пятачок (г. Кировск, Ленинградская область, Россия) используя такие методы геофизики, как георадиолокация, магниторазведка и сейсморазведка МПВ. Ввиду того, что на данной территории планируются строительные работы, крайне важно выявить представляющие опасность объекты, такие как неразорвавшиеся боеприпасы, предметы военной амуниции, техники и вооружения и др. Подобные исследования крайне важны при планировании строительства на территориях, на которых в прошлом велись боевые действия. Таким образом, в работе рассмотрены возможности и методика применения геофизических методов для решения задач военной археологии на примере объекта Невский пятачок. В результате были выявлены аномалии физических полей, характерные для искомых объектов, переданы документы и рекомендации к проведению строительных работ.

## **Abstract**

The methods of geophysics are widely applicable both in engineering surveys and in scientific research, including in military archaeology. This work is devoted to the search for military-historical artifacts of the Great Patriotic War at the Nevsky Pyatachok bridgehead (Kirovsk, Leningrad region, Russia) using such methods of geophysics as georadiolocation, magnetic exploration and seismic exploration. Due to the fact that construction works are planned on this territory, it is extremely important to identify dangerous objects, such as unexploded ordnance, items of military ammunition, equipment and weapons, etc. Such studies are extremely important when planning construction in territories where military operations were conducted in the past. Thus, the paper considers the possibilities and methods of using geophysical methods to solve the problems of military archaeology on the example of the Nevsky Pyatachok object. As a result, anomalies of physical fields characteristic of the desired objects were identified, documents and recommendations for construction work were transferred.

## Введение

Актуальность работы. Методы геофизической визуализации приобретают все больший вес в современных археологических проектах. Традиционные археологические исследования, предполагающие разрушение объекта поиска в процессе его изучения, не обеспечивают физическое сохранение объектов историко-культурного наследия. Археологическая геофизика значительно расширила реальную площадь исследуемой территории, помогая археологам исследовать большие территории и вести более разносторонние исследования (не только по материальным объектам или останкам). Информация, полученная в ходе одного геофизического исследования, позволяет археологам выбирать место своих раскопок с учетом априорных данных, что помогает оптимизировать ресурсы и повысить эффективность раскопок. Таким образом, актуальность археогеофизических исследований определяется объективными ограничениями по применению методов, традиционных для полевой археологии. Отдельным направлением археологических исследований является военная археология, направленная на выявление материальных свидетельств прошлых боевых действий, которые представляют исторический интерес, но могут являться и источником опасности.

Практическая значимость. На территории Ленинградской области известно множество мест, где во время войны проходили активные боевые действия. Одним из таких мест является Невский пятачок. Это был участок ожесточенных боёв, интенсивность боевых действий обусловила нахождение здесь большого количества военных артефактов. И даже после проведения специализированных работ по разминированию данной территории, под землей осталось ещё множество объектов, в том числе и останков.

Участком, представляющим отдельный интерес, является прилегающая к Невскому пятачку акватория Невы, по которой осуществлялась коммуникация с защитниками плацдарма, переброска сил, вооружения и провизии. Таким образом, здесь можно ожидать обнаружения затонувшей военной техники.

В настоящее время, территория Невского пятачка является единым мемориальным комплексом при музее «Прорыв Блокады Ленинграда». В 2020 году появились планы реконструкции и благоустройства прибрежной полосы с укреплением берега, созданием пандусов, обзорных площадок и прогулочной зоны. На данный момент ведется проектирование и планирование данных работ.

По сей день можно услышать о новых находках на «пяточке». Поэтому абсолютно необходимым этапом подготовительных работ для строительства в подобных местах военно-исторического значения является обследование территории с целью обнаружения не выявленных военных артефактов и останков. Для решения этой задачи могут и должны быть привлечены геофизические методы.

В рамках сотрудничества кафедры геофизики Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета с администрацией музея «Прорыв Блокады Ленинграда» в 2020-2022 годах на планируемом участке строительства силами сотрудников кафедры, студентов и привлеченных на безвозмездной основе частных компаний, таких как «Геоскан» и «ВИРГ-Рудгеофизика» проводились поисковые геофизические работы, целью которых был поиск подповерхностных объектов времен Великой Отечественной войны на территории Невского пяточка. Отдельной задачей является поиск военной техники, которая могла быть потеряна в реке Неве при переправе.

Ещё одним этапом стало изучение верхней части геологического разреза данной территории, представление о строении которой даст важную информацию, которая позволит произвести строительные работы.

#### Цель работы:

Целью работы является изучение верхней части разреза и выявление артефактов времен Великой Отечественной войны на участке планируемого строительства мемориального комплекса и прилегающей акватории реки Невы.

#### Задачи:

1. Проведение съемки на участке строительства разными геофизическими методами;
2. Определение нормального геологического разреза;
3. Определение источников геофизических аномалий;
4. Оценка параметров аномалообразующих объектов;
5. Составление карты аномалий на участке будущих строительных работ.

Научная новизна. В ходе работы методами георадиолокации и сейсморазведки, а также по геологическим описаниям был восстановлен нормальный геологический разрез территории. Впервые на участке мемориальной зоны Невского пяточка, примыкающим к берегу реки Невы проведены работы методами магниторазведки как в пешеходном варианте, так и с использованием БПЛА, а также с металлоискателем и георадаром. В результате подготовлены карты, схемы, разрезы и отчеты, отражающие геологическое строение верхней части разреза, а также расположение и параметры залегания подповерхностных аномалообразующих объектов на территории участка проведения будущих строительных работ.

Личный вклад автора. Автор данной работы выполнял топогеодезическую разметку профилей и точек, фотограмметрическую разведку местности, проводил наземную магнитометрическую и георадарную съемку, а также принимал участие в поисках с использованием металлоискателя. Далее автор выполнял обработку данных, которая заключалась в следующем: построение ортофотоплана и модели рельефа в ПО «AgiSoft Metashape» и «Geoscan Sputnik»; построение карты фактического материала в ПО «ArcMap» и «Surfer»; обработка данных магниторазведки в ПО «Oasis Montaj» и построение карт и карт графиков аномального магнитного поля и вертикального градиента магнитного поля; обработка данных георадиолокации в ПО «Geoscan 32»; построение схематического разреза по геологическим описаниям. На следующем этапе работы автором было выполнено моделирование и интерпретация данных комплексных исследований. На заключительном этапе в данных магниторазведки был учтен рельеф, а также построены модели аномалообразующих объектов, после чего проведена комплексная оценка данных, полученных всеми методами, сделаны выводы.

Благодарности. Работа выполнена на кафедре геофизики Института Наук о Земле Санкт-Петербургского Государственного Университета под руководством доцента Боброва Никиты Юрьевича, которому автор признателен за постоянную помощь и участие на всех этапах исследования. Также выражается искренняя благодарность всем, кто принимал участие в данной работе:

- Сотрудникам кафедры геофизики Института Наук о Земле Санкт-Петербургского Государственного Университета, заведующему кафедрой Титову Константину Владиславовичу за постоянную помощь на протяжении всей работы;

- Администрации музея «Прорыв Блокады Ленинграда», директору музея Пылеву Денису Валерьевичу за предоставленную историческую документацию и консультацию;
- Сотрудникам ООО «ВИРГ-Рудгеофизика» и особенно Тарасову Андрею Вячеславовичу за выполненные работы, предоставленные данные и консультацию;
- Сотрудникам ООО «Геоскан» за предоставленное топогеодезическое оборудование, консультацию и помощь в выполнении работ;
- Сотруднику ФГБУ «ВСЕГЕИ» Шитову Михаилу Вячеславовичу, за предоставленные геологические описания территории Невского пятачка;
- Студентам кафедры инженерной геодезии Санкт-Петербургского Горного университета и кафедры картографии и геоинформатики Санкт-Петербургского Государственного Университета за участие в работах.

# Основная часть

## Глава 1. Невский пятачок

Музей-заповедник «Прорыв блокады Ленинграда» создан в городе Кировск на местах ожесточенных боев за Ленинград в годы Великой Отечественной войны. Основной экспозиции музея является диорама, посвященная прорыву блокады Ленинграда в январе 1943 г. Музей-диорама является первым на данный момент единственным музеем такого рода на Северо-Западе.

Помимо музея-диорамы в состав заповедника «Прорыв блокады Ленинграда» входит мемориальный комплекс «Невский пятачок», синявинские высоты и место прорыва блокады – встречи войск Волховского и Ленинградского фронтов [Wikipedia].

### 1.1. История плацдарма

Плацдарм Невский пятачок находится на левом берегу Невы напротив Невской Дубровки (в 3 км от д. Марьино, на южной окраине г. Кировска) (рис. 1). Данная территория является плацдармом, на котором проходили ожесточенные бои 1941-1943 годов.

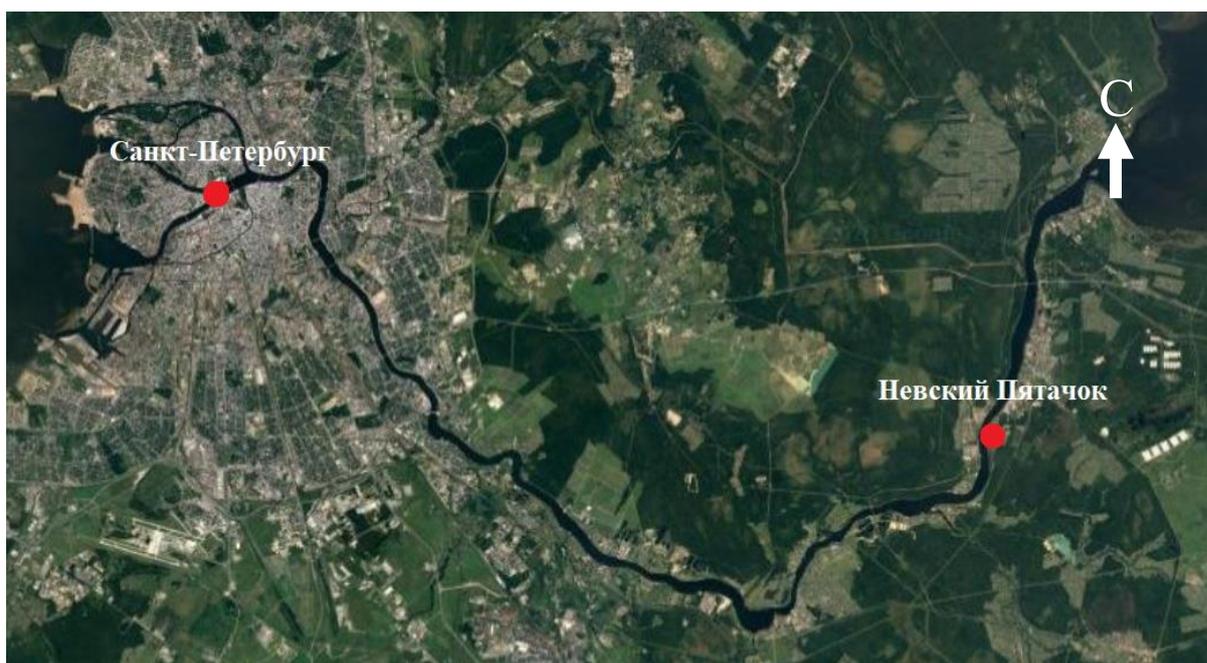


Рисунок 1. Расположение Невского пятачка на космоснимке

Главной целью военных операций советских войск в районе Невского пятачка в 1941-1943 годах был прорыв блокады Ленинграда. Все действия были направлены на форсирование Невы и развитие наступления на Синявино и Мгу навстречу войскам, которые наступали с востока, тем самым прорвав блокаду Ленинграда. Невский пятачок стал одним из символов мужества, героизма и самопожертвования советских воинов.

В историографии выделяются 4 операции:

- 1-я Синявинская операция (сентябрь 1941 года)
- 2-я Синявинская операция (октябрь — декабрь 1941 года)
- 3-я Синявинская операция (август — октябрь 1942 года)
- Операция «Искра» (январь — февраль 1943 года)
- Возникновение Невского пятачка, сентябрь — октябрь 1941 года

Невский пятачок неоднократно переходил под контроль то Красной армии, то Германских войск. В каждом бою обе стороны несли огромные потери как личного состава, так и техники с вооружением. Войсками Ленинградского фронта предпринимались множественные попытки переброски бронетанковой техники на Невский пятачок. Так в октябре-декабре 1941 года было переброшено около 100 танков, среди которых было 20 тяжелых КВ-1. Некоторые из них были потеряны при переправе, 35 единиц было подбито и выведено из строя уже на самом плацдарме, из которых 14 так и остались на поле боя.



*Рисунок 2. Отреставрированный танк KV-1, поднятый со дна Невы вблизи Невского пятачка [Wikipedia]*

На рисунке 2 представлен отреставрированный танк KV-1, который затонул в районе Невского пятачка осенью 1941 года и был со дна Невы в 2003 году. В ходе одной только Синявинской наступательной операции 1942 года для поддержки стрелковых соединений было выделено около 90 плавающих танков Т-38 [Мощанский, 2010] (рис. 3). С 8 сентября по 7 октября на пятачке было потеряно 34 танка из 48-го, 86-го и лёгкотанкового отдельных батальонов, из них подорвано при отходе 24 (8 Т-26, 1 БТ-2, 15 Т-37/38), сгорели в бою 2 Т-26 и утонули при переправах 8 (1 Т-26 и 7 Т-37/38) [Мощанский, 2010].



*Рисунок 3. Танк Т-38, музей «Прорыв блокады Ленинграда» (танк затонул в сентябре 1942 года и был поднят со дна Невы в 2005 году) [Wikipedia]*

## **Потери**

В разных источниках количество советских воинов погибших или получивших ранения в боях за Невский пятачок значительно отличается. Таким образом подсчеты говорят о потерях от 50 000 до 200 000 советских солдат погибли непосредственно на самом пятачке (без учёта потерь при переправе и на правом берегу) [Лебедев, 2005; Шигин, 2004]. Однако, согласно всем оценкам потери в боях за плацдарм были огромны.

По последним и наиболее реалистичным расчётам историка Г. А. Шигина советские войска в боях за плацдарм (только в 1941 году) потеряли убитыми и ранеными — 64 000 — 68 000 человек [Шигин, 2004], по мнению Ю. М. Лебедева — около 50 000 убитыми непосредственно на самом пятачке [Лебедев, 2005].

Потери немецких войск в боях в районе Невского пятачка тоже доподлинно не известны. По приблизительным подсчётам, они составили от 10 000 [Лебедев, 2005] до 35 000 — 40 000 солдат и офицеров убитыми.

## 1.2. Геофизические работы 2020-2022 года

По прошествии Великой Отечественной войны многое изменилось и на данный момент Невский пятак представляет собой заросшую кустарниками и деревьями территорию на левом берегу Невы. Местность имеет сложный рельеф с большим количеством рвов, ям, канав и кочек и крутым пятиметровым обрывом у берега Невы.

В послевоенные годы, в 1950-1960-х годах выполнялись специализированные работы по разминированию. Силами военно-патриотического объединения «Возвращение» весной 1990 года удалось обнаружить и раскопать командный пункт 330-го полка, который являлся одним из последних очагов обороны на плацдарме в апреле 1942 года. До сих пор чёрные копатели и официальные поисковые группы работают на Невском пятачке. Особенности местности — чередование заболоченных полос, твёрдого грунта, богатого песком, и болота — позволяют утверждать, что останки большинства солдат и большая часть снаряжения погребена здесь навсегда. В 2012 году на территории были попытки разработки песчаного карьера, но работы остановили после вмешательства общественности.

Все упомянутые события говорят о неоспоримом военно-историческом значении Невского «пятачка» и важности безопасного благоустройства данной территории без утери её исторического облика.

Данная работа направлена на поиск объектов, захороненных на территории Невского «пятачка», а также военной техники, которая могла быть потоплена в реке Неве в ходе боевых действий, что является отдельной задачей. По сей день можно услышать о новых находках на «пятачке». Это говорит о том, что до сих пор там погребены склады оружия и боеприпасов, останки бойцов. Данные задачи могут быть решены различными геофизическими методами.

В 2020 году появились планы реконструкции и благоустройства прибрежной полосы с укреплением берега, созданием пандусов и обзорных площадок. На данный момент ведется проектирование и планирование данных работ. Таким образом, следующим этапом, после поисков и выделения вышеописанных объектов стало изучение верхней части геологического разреза данной территории, представление о строении которой даст важную информацию, которая позволит провести работы по благоустройству.

## Глава 2. Обзор поисковых методов военной археологии

Методы геофизической визуализации, применяемые в археологии, приобретают все больший вес в современных археологических проектах. Первые поколения инструментов геофизической съемки в 1980-х годах, которые были разработаны специально для археологических целей, раскрыли потенциал этих методов. Геофизики разных стран способствовали расширению специализации в методах съемки, обработке и интерпретации данных, что привело к появлению четко определенной дисциплины, называемой археологической геофизикой. За последние десять лет возможности используемых приборов повысили качество данных, разрешение и скорость съемки (и снизили стоимость их применения), что привело к тому, что археологическая геофизика стала одним из самых ценных инструментов в руках археологов.

Использование геофизических исследований для определения границ участков, выявление культурных и военно-исторических артефактов при низких затратах и неразрушающим способом позволило по-другому подходить к археологическим исследованиям. С одной стороны, археологическая геофизика значительно расширила реальную площадь исследуемой территории, помогая археологам исследовать большие территории и вести более разносторонние исследования (не только по материальным объектам или останкам). Информация, полученная в ходе одного геофизического исследования, позволяет археологам выбирать место своих раскопок с учетом априорных данных, что помогает оптимизировать ресурсы и повысить эффективность раскопок.

Известно множество примеров успешного применения геофизических методов в современной археологии. Традиционные археологические работы предполагают раскопки, что является намного более дорогостоящим и трудоёмким процессом. Кроме того, расширение области раскопок не всегда дает дополнительную информацию для военно-исторической интерпретации. Традиционные археологические исследования, предполагающие разрушения объекта в процессе его изучения, не обеспечивают физическое сохранение объектов военно-исторического наследия. Таким образом, актуальность археогеофизических исследований определяется объективными ограничениями по применению методов, традиционных для полевой археологии.

И.В. Журбин утверждал, что: «археогеофизический подход предполагает возможность выделения эталонных для территории объектов, локальные раскопки этих объектов и сохранение в первозданном виде всей остальной территории памятника. Использование геофизических методов частично решает проблему охранных раскопок. Ввиду постоянного расширения инфраструктуры и территории городской застройки часто возникает проблема отвода под строительство участков, содержащих объекты археологии, Существующее законодательство предполагает археологическое согласование и выделение средств на охранные раскопки. Однако время, в течение которого возможны археологические раскопки, зачастую весьма ограничено. Единственным решением проблемы в данном случае является применение оперативных геофизических методов. Кроме того, оперативные и неразрушающие геофизические методы являются единственным эффективным способом изучения и дальнейшего сохранения исторических и археологических объектов, которые не могут быть исследованы раскопками. Таким образом, основными факторами, определяющими привлекательность геофизических методов для археологии, являются их оперативность, принцип сохранения объекта исследования, возможность существенного сокращения финансовых расходов и трудозатрат» [Журбин, 2004].

Геофизические методы исследования грунтов различаются по виду изучаемых физических полей. Геофизические методы можно разделить на следующие группы: магнитометрические, электрометрические, гравиметрические, сейсмоакустические, ядерно-физические, термометрические. Эффективность применения каждого из этих методов зависит от параметров залегания, физико-химических характеристик объекта, а также рельефа территории, строения и состава верхней части разреза в районе поисков, будет зависеть то насколько применим тот или иной метод. В археологических исследованиях наилучшие результаты дает применение магнитной и электрической разведки. Остальные методы для полевых археологических исследований применяются достаточно редко и только в комплексе с электроразведкой или магниторазведкой. Это связано с ограниченным кругом объектов, которые выделяются в геофизических полях, характер изменения которых регистрируется данной аппаратурой [Журбин, 2004].

В последние годы, методы археогеофизики стали применяться, в том числе, и для системного поиска и картирования объектов, оставшихся со времен Второй мировой войны [Everett и др., 2006; Gaffney и др., 2004; Rees-Hughes и др., 2016; Борисик, Пятигорский, 2021]. Часто, искомые объекты расположены в районах с высоким уровнем промышленных помех, и имеют незначительные размеры или невысокую контрастность

относительно вмещающей среды [Борисик, Пятигорский, 2021]. Поэтому, для уверенного выделения и идентификации объектов, необходимо применение комплекса геофизических методов [Никитин, Хмелевской, 2004]. Использование плотных систем наблюдений вместе с высокоточной привязкой получаемой информации позволяет с высокой детальностью выделять разномасштабные объекты и восстанавливать общий план изучаемой территории. Всё это способствует минимизации трудоёмких земляных работ и многократно уменьшает стоимость проводимых исследований [Борисик, Пятигорский, 2021].

Таким образом, далее будут рассмотрены физические основы и особенности применения основных археогеофизических методов.

## 2.1. Поиски с использованием металлоискателей

Сегодня использование неразрушающих и неинвазивных методов археологических исследований укоренилось, и археологи все чаще обращаются к методам дистанционного зондирования для первоначального исследования местности. Хотя современные металлоискатели достаточно просты в эксплуатации, они являются очень эффективными исследовательскими инструментами, которые использовались археологами чаще, чем можно было бы предположить из опубликованных отчетов. Одним из первых документально подтвержденных примеров использования металлоискателей был военный историк Дон Рики (1958), который использовал один из детекторов для определения местоположения огневых рубежей сражений Бигхорн и Биг-Хоул в Монтане.

Два других задокументированных случая использования металлоискателя на археологических объектах произошли в 1960-х годах и служат иллюстрацией того, что металлодетекторы часто применимы в археологии. В одном случае археолог-любитель Стэнли Лэндис, обнаружил и задокументировал особенности расположения лагеря Континентальной армии времен войны за независимость в Вэлли Фордж [Parrington, Schenck, Thibaut, 1984]. Крупный проект с участием детекторов – поиски на поле битвы Литтл-Бигхорн, штат Монтана, в 1984 и 1985 годах [Scott, Fox, 1987]

Добисон и Денисон (1995) провели всестороннюю оценку обнаружения металлов и археологии в Соединенном Королевстве. Они обнаружили, что каждый год в Англии детекторы делают буквально десятки тысяч новых находок.

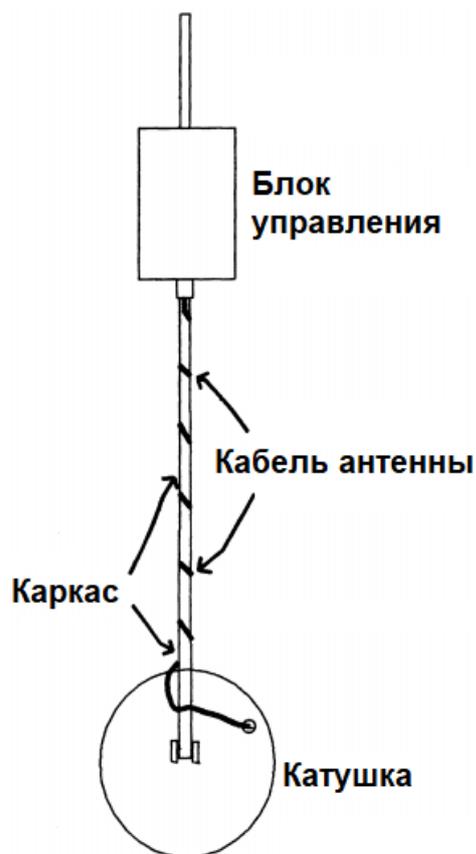
Эти и другие археологические исследования с использованием металлодетекторов продемонстрировали, что в сочетании с традиционными методами визуального обследования, зондированием лопатами и пробными раскопками металлодетекторы являются ценными инструментами. Они могут помочь в установлении распределения металлических обломков на участке, что может помочь археологу в установлении границ участка, обнаружении захороненных отложений, мусора и обнаружении захороненных останков.

Металлодетекторы могут использоваться для идентификации объектов даже при отсутствии поверхностных свидетельств [Scott и др., 1989]. Они могут помочь определить границы участка, установив объем металлического мусора, связанного с деятельностью человека. При систематическом использовании их можно использовать

для поиска артефактов, которые могут быть легко пропущены при классических работах, а металлоискатели можно использовать для изучения закономерностей распределения металлических артефактов по участку, не прибегая к дорогостоящим и трудоемким раскопкам. Металлоискатели могут помочь в планировании тестирования и стратегий раскопок, поскольку они могут обнаруживать захороненные отдельные металлические артефакты или скопления металлических артефактов, тем самым предоставляя информацию в дополнение к инвентарным данным и документальным свидетельствам, которые регулярно используются при планировании раскопок [Connor, Scott, Douglas, 2016].

### **Принцип работы**

Металлоискатель - один из наименее дорогих геофизических приборов. Детектор реагирует на электрическую проводимость объектов [Heimmer, 1992]. Все металлоискатели работают по одному и тому же общему принципу, и базовая конфигурация включает в себя ручку, поисковую катушку, кабель и металлический ящик, в котором находится аккумулятор и блок управления (рис. 4).

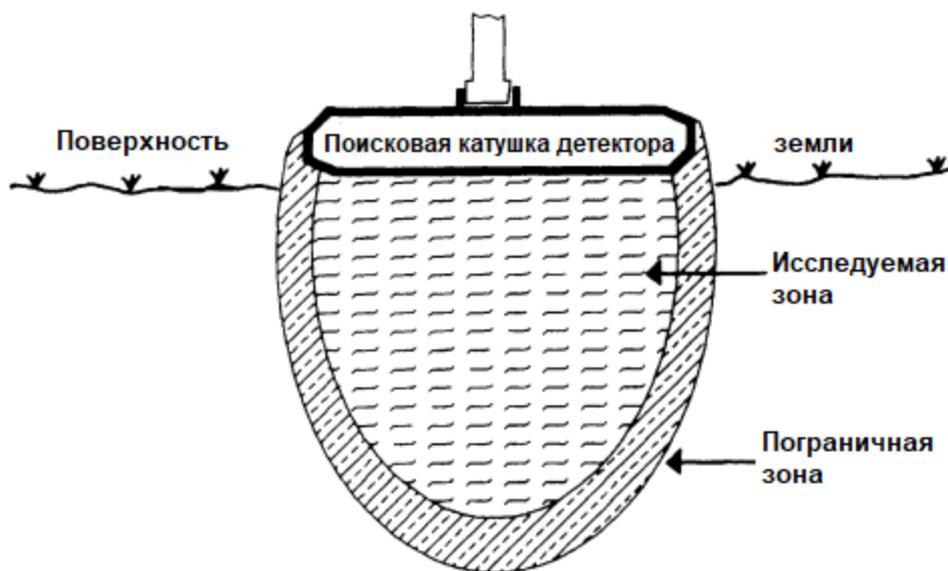


*Рисунок 4. Схематичное строение металлоискателя*

Поисковая катушка содержит плоскую круглую намотку провода (антенну),

которая генерирует электромагнитное поле. Когда металлические предметы находятся рядом с этой катушкой, создаются вихревые токи, которые обнаруживаются устройством и преобразуются в визуальное цифровое или аналоговое представление и/или излучаются в виде звукового сигнала.

Поисковые катушки бывают самых разных размеров. Электромагнитное поле, создаваемое поисковой катушкой, удерживаемой на поверхности земли, проникает в землю в форме конуса, исходящего вниз от катушки (рис. 5).



*Рисунок 5. Зона исследования металлоискателя*

По сути, чем больше катушка, тем сильнее электромагнитное поле и тем глубже могут быть обнаружены скрытые артефакты. Катушки меньшего размера легки и просты в использовании, но проникают менее глубоко. На большинстве аппаратов катушки взаимозаменяемы, и можно приобрести несколько катушек и использовать их для различных целей, таких как глубинный поиск или точное определение целей. Для очень глубокого обнаружения также доступны специальные детекторы с двумя катушками. Их возможности ограничены поиском более крупных целей или скоплений металлических предметов на глубине около 1 метра

Большинство поисковых катушек могут быть погружены в пресную воду, что позволяет использовать металлоискатель под водой до тех пор, пока пульт управления не погружен в воду. Поиск артефактов в воде достаточно сложен, как и точное определение местоположения артефакта после его обнаружения. Также доступны специализированные детекторы, которые работают полностью под водой и являются

важными инструментами в подводной археологии [Connor, Scott, Douglas, 2016]. Детекторы, используемые в среде с соленой водой, используют технологию импульсной индукции, поскольку минерализованные среды или среды с высоким содержанием соли, такие как морская вода, препятствуют работе обычных детекторов.

Возвращаясь к устройству металлодетектора, поисковая катушка обычно монтируется на металлической ручке или стержне, электрический кабель соединяет антенну в поисковой катушке с корпусом управления и наматывается на стержень. Важно, чтобы кабель был намотан плотно и надежно, чтобы индуктивность и емкость кабеля не менялись во время использования, тем самым изменяя настройку детектора.

Электромагнитное поле, создаваемое детекторами, вызывает вихревые токи циркулируют вокруг материалов, которые проводят электричество. Металлы различаются по своей электрической проводимости, и, в принципе, сложный детектор может определить, какой скрытый металл обнаруживается. Эта функция распознавания не всегда надежна, поскольку форма, размер и ориентация металлических объектов также влияют на показания детектора. Однако многие детекторы могут надежно отличать железные предметы от всех других металлов, поскольку железные предметы являются магнитными, а также хорошими проводниками. Некоторые детекторы имеют электронный дисплей или звуковой сигнал, который определяет тип обнаруженного металла. Многие популярные детекторы имеют дискриминатор с выдвижным язычком, который настроен так, чтобы прибор не реагировал на алюминий. В большинстве археологических исследований режим распознавания не следует использовать, поскольку металлоискатель будет использоваться для обнаружения всех типов металлических объектов, связанных с событиями прошлого. Алюминий находится в диапазоне проводимости нескольких других металлов, так что, если настройка прибора не является точной, сигналы, генерируемые близкими к проводящим алюминиевым металлам, могут быть пропущены. Лучше всего использовать детектор металла в цельнометаллическом или недискриминационном режиме во время исследований археологических раскопок.

Как и другие устройства дистанционного зондирования, металлоискатели реагируют на изменения влажности и содержания металлов в почвах. Когда детектор впервые используется в какой-либо местности, его необходимо настроить (сбалансировать по грунту) на общий фоновый уровень влажности и металла в почве. Обычно это делается ручкой настройки до тех пор, пока не будет достигнут устойчивый,

низкий гул. Даже при правильной настройке ложные сигналы могут иногда генерироваться минерализованными породами, залежами металлических или других минерализованных почв или даже участками с высокой влажностью, все из которых проводят электричество за пределы порога, сбалансированного с землей прибора. Большинство детекторов, выпускаемых сегодня, являются самонастраивающимися или сбалансированными по земле, так что простое включение устройства, удерживая катушку на уровне пояса в течение нескольких секунд, а затем помещая катушку на поверхность земли, позволит достичь баланса земли. Детекторы, использующие ту же электронную частоту, реагируют друг на друга, искажая и нарушая сигнал друг друга. Поскольку металлодетекторы одной марки часто работают на одной и той же электронной частоте, необходимо регулировать рабочую частоту или держать эти устройства физически отделенными друг от друга, чтобы исключить искажение сигнала.

Таким образом, металлодетекторы могут помочь в восстановлении археологической информации практически с любого участка, на котором содержится металл. Без раскопок, просто обнаруживая место и отмечая "цели", археолог может легко исследовать распределение и различную плотность металлических артефактов в пределах участка. Это может помочь в определении структуры подповерхностного пространства и в установлении границ интересующей зоны.

Основные преимущества использования металлоискателя на объектах, где могут присутствовать металлические артефакты:

- Металлоискатели являются относительно недорогим инструментом дистанционного зондирования;
- Металлоискатели наиболее полезны для обнаружения неглубоких захоронений (25-30 см) металлических предметов;
- Металлоискатели легко освоить в использовании и эксплуатации.

## 2.2. Магниторазведка

Магниторазведкой сокращенно называется метод изучения геологического строения, поисков и разведки полезных ископаемых, основанный на использовании изменений геомагнитного поля вследствие неодинаковой намагниченности различных горных пород. [Апლოнов, Титов, 2010; Логачев, 1968]. На Земле существует естественное магнитное поле, создаваемое электрическими токами во внешнем ядре и нижней мантии. Эти токи создают постоянное магнитное поле. Магнитное поле является векторным полем, т. е. его можно описать по величине и направлению. Магнитное поле состоит из трех компонентов: (1) первичного магнитного поля, источник которого находится внутри Земли; (2) флуктуирующее переменное во времени поле, происхождение которого находится вне Земли, т.е. порожденное взаимодействием солнечного ветра с постоянным магнитным полем Земли; (3) И локальное аномальное поле, происхождение которого связано с намагничиванием материала в верхней части земной коры.

Степень влияния того или иного объекта на магнитное поле определяется его физическими свойствами и контрастностью этих свойств по отношению к вмещающей среде. Чаще всего «магнитность» вещества описывают через магнитную восприимчивость «к». Для измерения к в полевых условиях применяют специальные приборы – каппаметры. Наиболее часто магнитные свойства проявляют некоторые окислы железа, например магнетит ( $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ). В естественном состоянии железо распределено в земной коре и составляет около 5% её массы. При этом в почвах и некоторых горных породах (например, в глинах) железо содержится в виде немагнитных соединений.

Можно выделить три основных этапа магниторазведки:

1. измерение характеристик магнитного поля (или их производных);
2. обработка результатов наблюдений;
3. геологическое истолкование результатов.

С точки зрения археологии наиболее интересно влияние человеческой деятельности на магнитную восприимчивость различных грунтов. Здесь важно отметить, что при метаморфизме немагнитные гидроокислы железа способны переходить в магнитные соединения. Такой же процесс происходит при обжиге глин, что обуславливает значительную магнитную восприимчивость кирпича и керамики.

Аналогичные преобразования происходят при готовке, обогреве жилища и прочих бытовых делах. Менее очевидным проявлением описанного механизма является повышение магнитной восприимчивости в результате гниения, сопряжённого с выделением тепла, и других процессов почвообразования, что объясняет повышенную магнитную восприимчивость почв. Помимо процессов, связанных с преобразованием вещества, важную роль играет и перенос. Так, локальное понижение рельефа со временем будет заполняться почвенными частичками, что приведёт к повышению магнитной восприимчивости на этом участке.

Аномальный эффект от почвенных неоднородностей может достигать 20 нТл, обожжённые объекты (такие как печи) могут формировать аномалии до 1000 нТл, а железные предметы и шлаки – до 2000 нТл [Восс, Мельников, Смекалова Т.Н., 2007]. Аномальный эффект от конкретного объекта определяется контрастностью его магнитной восприимчивости по сравнению с вмещающей средой, размерами и глубиной залегания. Если размер связан с амплитудой линейно, то глубина влияет чуть более сложным образом – приповерхностные объекты имеют большую амплитуду, но маленькую ширину, глубинные – наоборот.

Форма аномалий может быть различной. Аномалия от точечного источника имеет форму диполя, отрицательный полюс которого направлен на магнитный север, а положительный – на юг. Стоит отметить, что подобная конфигурация может быть осложнена остаточной намагниченностью. С другой стороны, объекты сложных форм могут формировать столь же разнообразные аномалии, вплоть до взаимной компенсации аномального эффекта и отсутствия явно выраженной аномалии.

Исходя из вышесказанного, можно в первом приближении сформировать перечень объектов, хорошо подходящих для выявления магниторазведкой:

- Печи, горны, объекты производства;
- Фундаменты и фрагменты сооружений, инфраструктура;
- Крупные металлические объекты;
- Ямы, рвы, колодцы и иные почвенные неоднородности;
- Достаточно крупные полости.

Первое применение магниторазведки в археологических целях относится к концу 1950-х гг. прошлого века, наиболее активный этап начинается с 1990-х гг. За эти 40 лет были сделаны важные шаги в вопросах разработки аппаратуры, развития методик

измерения, обработки и интерпретации результатов [Herbich, 2015]. Хорошим примером современных военно-археологических исследований является недавняя работа А.Л. Борисика и Е.В. Пятигорского, посвященная реконструкция линии немецкой береговой обороны 1942-1944 гг. и поиску объектов военно-исторического наследия о. Большой Тютерс по данным геофизических методов и натурных раскопок.

Другими словами, магниторазведка находит своё применение, как в поселенческой и погребальной, так и в военной археологии. При анализе результатов магниторазведочных работ важно понимать, что магнитное поле не отражает в явном виде информации о составе или форме аномалообразующего объекта: подобные заключения есть, и редко бывают однозначны. Основными помехами для магниторазведки являются всевозможные металлические объекты (автомобили, заборы, сооружения и т.д.), линии электропередач, подземные коммуникации и т.д., что существенно снижает эффективность магниторазведки, например в городских условиях.

Метод магниторазведки можно разделить на две модификации: наземную и аэро. Использование каждой из этих разновидностей имеет свои ограничения и преимущества. Наземный (пешеходный) вариант магнитометрии обычно используется для более детальных и мелкомасштабных работ с малым шагом измерений и расстоянием между профилями. Однако, сложный изрезанный рельеф и сильное техногенное загрязнение, как, например на Невском пятачке будут являться существенными помехами, влияние которых можно избежать при использовании аэромагниторазведки. Аэро модификация метода магнитометрии будет давать лучшую устойчивость от влияния мелких магнитных объектов (техногенного мусора, мелких построек и т.д.). Также, поскольку полет проходит на одном уровне, необходимость учета изменяющейся высоты съемки отпадает. Однако при работах на территории с объектами, которые могут стать препятствием для полета летательного аппарата (возвышенности, строения, растительность) следует учесть их высоту, либо отказаться от использования ЛА в качестве носителя магнитометра.

## 2.3. Георадиолокация

### Физические основы георадиолокации

#### *Принцип действия*

Принцип действия аппаратуры подповерхностного радиолокационного зондирования (в общепринятой терминологии - георадара) основан на излучении сверхширокополосных (наносекундных) импульсов метрового и дециметрового диапазона электромагнитных волн и приеме сигналов, отраженных от границ раздела слоев зондируемой среды, имеющих различные электрофизические свойства [Владов, Старовойтов, 2004]. Такими границами раздела могут быть контакты различных пачек и слоёв осадочных пород, влагонасыщенных и сухих грунтов, границы раздела осадочных и кристаллических пород, искусственные объекты или любая другая граница раздела, обладающая контрастными диэлектрическими свойствами. Диэлектрические свойства материалов коррелируют со многими механическими и геологическими параметрами материалов.

Передающей антенной в землю испускается электромагнитный импульс  $f_0(t)$ , а на выходе среды приемная антенна регистрирует отклик среды – совокупность волн, которые отличаются друг от друга интенсивностью, временами пробега, и формой. В георадиолокации информация о среде содержится в кинематических и динамических характеристиках данных волн. Под такими характеристиками понимаются двойные времена пробега волн, характер дисперсии фазовых скоростей в среде и информация о потерях, которые связаны с токами проводимости [Владов, Старовойтов, 2004].

Глубинность исследований на самых низких частотах, в среднем, не превышает 10-15 м. При этом разрешающая способность не хуже половины длины волны, то есть лежит в пределах от 1 сантиметра до 1 метра. Таким образом, разрешающая способность георадиолокации значительно лучше, чем в методе сейсморазведки. С помощью георадара можно решать многие задачи, например, локализации мелких и замкнутых неоднородностей, что недоступно сейсморазведке [Владов, Старовойтов, 2004].

В данной работе использовался георадар ОКО-2 с антенным блоком АБ-250 и частотой зондирующего импульса 250 МГц. Максимальная глубинность исследования составляет 8 м с разрешающей способностью 0,25 м.

Значения основных параметров в среде определяются следующими свойствами: структурой, текстурой пород, их обводненностью, которые, в свою очередь, связаны с литологией, степенью нарушенности, пористостью (пустотностью) и другими причинами, имеющими природное или техногенное происхождение [Владов, Старовойтов, 2004].

Как утверждается в учебном пособии М.Л. Влодова и А.В. Старовойтова: «наиболее важными параметрами, характеризующими возможности применения метода георадиолокации в различных средах, являются удельное затухание и скорость распространения электромагнитных волн в среде, которые определяются ее электрическими свойствами. Первый из них определяет глубинность зондирования используемого георадара, знание второго параметра необходимо для пересчета временной задержки отраженного импульса в глубину до отражающей границы. Практически все вещества, кроме чистого металла, могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим вводится комплексная относительная (относительно вакуума, где диэлектрическая проницаемость равна  $\epsilon_0$ ) диэлектрическая проницаемость:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'',$$

где  $\epsilon$  - комплексная относительная проницаемость,  $\epsilon'$  - действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля, а  $\epsilon''$  - мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика (в Ом/м):

$$\sigma = \omega\epsilon''\epsilon_0,$$

где  $\omega$  - частота приложенного электромагнитного поля.

Диэлектрические потери характеризуются тангенсом угла - отношением мнимой и действительной частей относительной диэлектрической проницаемости:

$$\operatorname{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon' = \sigma / \omega\epsilon'\epsilon_0.$$

Скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике зависит от его диэлектрической и магнитной проницаемостей, однако, для большинства горных пород значение магнитной проницаемости близко к 1 и не зависит от частоты поля. С учетом этого, фазовая скорость распространения волны будет:

$V = c / \operatorname{Re}\sqrt{\epsilon} = c / \sqrt{\epsilon'}$ , где  $c$  - скорость распространения электромагнитных волн в вакууме. Это одно из наиболее важных для радарных исследований соотношение, поскольку  $V$  - измеряемая величина, а  $\epsilon'$  - свойство вещества»

Зависимость комплексной диэлектрической проницаемости от частоты даже для однородного диэлектрика в большой степени определяется временем поляризации  $\tau$ . Поляризация диэлектриков делится на упругую и релаксационную. Упругая поляризация заключается в смещении упруго связанных зарядов под действием приложенного электромагнитного поля. Время установления такой поляризации лежит в пределах  $10^{-12}$  -  $10^{-15}$  секунды в зависимости от того, что меняет свое положение- электроны, атомы или полярные молекулы [Влодов, Старовойтов, 2004].

Релаксационная (тепловая) поляризация характерна для диэлектриков, содержащих слабо связанные частицы, способные менять положение равновесия при тепловом движении. Под действием приложенного напряжения в тепловом движении появляется упорядоченность. Время установления такой поляризации лежит в пределах  $10^{-2}$ - $10^{-11}$  секунды. Так, например, для воды время поляризации составляет  $10^{-11}$  секунды и ее диэлектрическая проницаемость не меняется до частот порядка  $10^{10}$  Гц. Для льда  $\tau$   $10^{-5}$  с и для частот выше 108 Гц диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты [Владов, Старовойтов, 2004].

Среда	Относительная диэлектрическая проницаемость	Удельное затухание, дБ/м	Скорость распространения волн, м/нс
Воздух	1	0	0,300
Песок влажный	20 — 30	0,5 — 5	0,055 — 0,067
Песок сухой	4 — 6	0,01 — 1,5	0,122 — 0,150
Суглинок влажный	10 — 20		0,067 — 0,095
Суглинок сухой	4 — 6		0,122 — 0,150
Глина влажная	19 — 27	25 — 110	0,058 — 0,069
Глина сухая	2 — 7	3 — 14	0,113 — 0,212
Торф	50 — 78		0,034 — 0,042
Ил	13 — 27		0,058 — 0,083
Гранит	9		0,100
Бетон сухой	3 — 7	1 — 7	0,090 — 0,113
Асфальт сухой	3 — 6	2 — 15	0,122 — 0,173
Пресный лёд	4	0,1 — 3,5	0,150
Пресная вода	81	0,10	0,033

*Рисунок 6. Электрофизические параметры некоторых сред.*

Таким образом:

- основным признаком для расчленения толщи искусственных или естественных слоев является их контраст по диэлектрической проницаемости;

- для решения инженерных задач необходимо установить связи между диэлектрической проницаемостью и требуемыми характеристиками вещества - влагонасыщенностью, литологией, агрегатным состоянием и т.д., что может быть сделано в каждом конкретном случае с помощью параметрических наблюдений, скважин, лабораторных измерений и т.п.

#### ***Отражение электромагнитных волн.***

Коэффициент отражения при нормальном падении волны на границу двух слоев 1 и 2 с различной диэлектрической проницаемостью будет:  $\epsilon'$

$$K_{OTR} = (\sqrt{\epsilon_1'} - \sqrt{\epsilon_2'}) / (\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'}) .$$

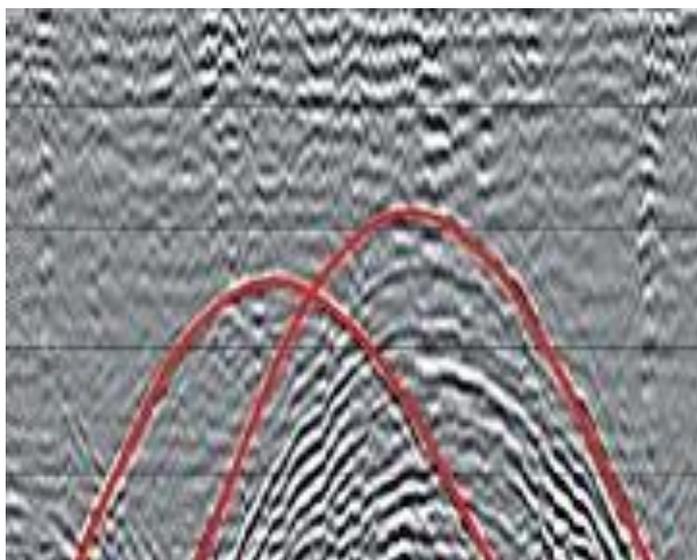
#### ***Преломление электромагнитных волн.***

Коэффициент преломления (прохождения через границу) будет равен:

$K_{\text{ПР}} = 1 - K_{\text{ОТР}} = 2 \sqrt{\epsilon_2'} / (\sqrt{\epsilon_1'} + \sqrt{\epsilon_2'})$ . При двукратном прохождении через границу, например, при отражении от более глубокой границы, суммарное уменьшение амплитуды сигнала будет равно  $1 - K_{\text{ОТР}}^2$

### ***Дифракция электромагнитных волн.***

Это явление наблюдается при прохождении электромагнитных волн через среду с резкими неоднородностями. Это явления присуще волнам любой частоты. Суть явления состоит в том, что в соответствии с принципом Гюйгенса, каждая точка фронта волны представляет собой элементарный вторичный источник волн. На небольшой в сравнении с длиной волны поверхности объекта эти элементарные источники складываются. В итоге весь объект представляет собой вторичный источник электромагнитных волн в среде. Это явление чрезвычайно важно для георадиолокационных исследований, так как выявление на записях волновых картин вторичных источников излучения говорит о наличии локального объекта. Данное явление позволяет также определить глубину залегания объекта и скорость распространения электромагнитных волн в среде над объектом [Владов, Старовойтов, 2004]. С помощью таких ПО как «GeoScan» можно производить подбор значений эpsilon по дифрагированным объектам (рис. 7)



*Рисунок 7. Фрагмент радарограммы с выделенными дифракциями от точечных объектов*

### *Затухание электромагнитных волн.*

Под затуханием чаще всего понимают общее уменьшение амплитуды зондирующего сигнала при прохождении его через среду до отражающей границы и обратно к приемнику. Факторами, вызывающими уменьшение амплитуды, являются следующие:

- отражение и преломление на промежуточных границах (рассмотрено выше);
- потери, связанные с проводимостью среды (рассмотрено выше);
- геометрическое расхождение фронта волны.

Георадар имеет множество различных применений и играет важную роль в археологических работах [Conyers, 2013; Conyers, 2016]. В научной литературе имеется множество статей, которые иллюстрируют использование георадара для обнаружения и картографирования погребенных археологических объектов, для изучения древних построек, мостов, колонн и статуй, для исследования фресок, мозаик и украшений, а также для исследования внутреннего строения других объектов, представляющих историческую ценность [Bianco и др., 2019; Deiana, Leucci, Martorana, 2018; Malfitana и др., 2015; Urban и др., 2015].

Георадиолокация была введена в археологию в 1970-х годах [Conyers, 1997]. В исследованиях, проведенных в каньоне Чако, штат Нью-Мексико, в 1974-1976 годах [Vickers, Dolphin, Johnson, 1976], рассматриваются как первое, частично успешное георадарное археологическое исследование. Георадарные археологические исследования начались как маломасштабные исследования для детектирования погребенных объектов и оценке их основных геометрических и физических свойств. В последние годы, благодаря технологическим достижениям, чувствительность и разрешающая способность георадиолокационных систем значительно возросли; более того, появление многоканальных радиолокационных систем, оснащенных антенными решетками, позволило повысить эффективность съемки и разрешение пространственной выборки [Novo и др., 2013]. Наличие программного обеспечения для расширенной обработки данных [Goodman, Piro, 2013] и полноволнового электромагнитного моделирования [Giannopoulos, 2005] также сыграло решающую роль в более сложном применении метода георадиолокации.

Важной задачей, которую можно решить с помощью георадара, является превентивное обнаружение объектов военной истории в местах текущих или будущих строительных работ; такая ситуация довольно распространена в городских районах, где в связи с развитием города могут потребоваться различные инженерные работы в районах проведения боевых действий в прошлом. Таким образом проведение

георадарной съемки перед строительством предпочтительно ввиду возможного нахождения боеприпасов, оружия, взрывчатых веществ или военной техники в подповерхностном пространстве [Łyskowski и др., 2018; Pérez Gracia и др., 2000; Trinks и др., 2009].

Очень часто георадар сочетается с другими методами съемки, такими как дистанционное зондирование (например, гиперспектральные изображения и воздушное лазерное сканирование), геофизическими методами (например, томография электрического сопротивления и магнитная градиентометрия) и другие неинвазивные подходы [Monterroso-Checa и др., 2019; Mozzi и др., 2016; Trinks, Neubauer, Hinterleitner, 2014]

Результаты военно-археологических георадарных исследований сильно зависят не только от навыков оператора, но и от ряда факторов окружающей среды: содержание воды и минеральный состав почвы; размер, форма, глубина залегания и состояние сохранности искомых объектов; топография района исследования.; и неоднородность окружающей среды, а именно наличие целей, отличных от искомых, таких как камни, мусор, корни, инженерные коммуникации и многое другое.

В то время как однородное строение верхней части разреза создает идеальные условия для георадарных исследований, зачастую территории, на которых расположены исследуемые объекты представляют собой зоны с чрезвычайно сложным строением ВЧР, дифференцированным рельефом и сильным техногенным загрязнением. Здания, стены, уличные фонари, дорожные знаки, мусорные баки, бордюрные камни, дорожные островки, канализационные люки и овраги, деревья и транспортные средства являются примерами рассеивающих объектов, обычно встречающихся в городской местности, являются источником помех. Изменения строения поверхности (слои асфальта проезжей части и тротуара с различными свойствами, булыжники, мощение, почва, гравий, трава) создают контраст в амплитудах электрического поля, измеряемых в георадиолокации. Кроме того, на небольшой глубине обычно находится много труб и кабелей, изготовленных из различных материалов и проложенных в разных направлениях, щебня и мусора; также могут быть корни деревьев, засыпанные траншеи и ямы, подвалы и полости, колодцы и туннели, могилы, фундаментные стены бывших сооружений и многое другое.

При использовании георадара применяются различные методики сбора данных. Простейшим методом является измерения в ряде определенных точек: при археологических и военно-археологических исследованиях этот подход применяется,

когда рельеф не позволяет перемещать антенны радара вдоль профиля. Сбор данных со смещением вдоль профиля предоставляет больше информации о глубинном строении, поскольку он дает 2D изображения строения земли; при археологических исследованиях этот метод обычно используется в узких областях. Оптимальным методом является сбор данных по регулярной сети профилей; этот подход позволяет получать 3D изображение подповерхностного строения и горизонтальные радиолокационные карты на разных глубинах (срезы), которые чрезвычайно полезны для точной интерпретации данных и для определения аномалий, представляющих интерес. В случае сильно изрезанного рельефа и наличия объектов, осложняющих съемку также возможно получать интерполированные радиолокационные изображения из данных, полученных по нерегулярным сетям наблюдения.

## 2.4. Сейсморазведка

За длительную историю развития метода малоглубинной сейсморазведки сформировался круг решаемых ею задач, а также методические особенности её проведения и интерпретации получаемых материалов. К основным геологическим задачам, решаемым малоглубинной сейсморазведкой, можно отнести [Палагин, Попов, Дик, 1989]

1) изучение строения верхней части разреза (ВЧР) под обоснование строительства сооружений и поиска подземных вод в инженерной геологии и гидрогеологии, а также при поиске и разведке твёрдых полезных ископаемых;

2) изучение состава, свойств и состояния пород ВЧР, в том числе выявление и изучение включений и неоднородностей в коренных и перекрывающих их осадочных породах;

3) изучение геологических и инженерно-геологических процессов: динамики оползней, колебаний уровня грунтовых вод и т. п.

При этом основным сейсмическим методом для изучения глубин 0–100 м является метод преломлённых волн (МПВ). [Боганик, Гурвич, 2006]. Характерной особенностью малоглубинной сейсморазведки является то, что конкретные сейсмогеологические условия определяют выбор методических приёмов при решении той или иной геологической задачи. Существует огромное многообразие моделей ВЧР, отличающихся своими сейсмогеологическими характеристиками, этот факт требует проведения опытных исследований для корректного выбора типа полезных волн, оптимальных систем их наблюдения, параметров регистрации, средств подавления волн-помех на конкретном объекте [Степанов, Головцов, 2013].

Возможность применения малоглубинной сейсморазведки в археологии основывается на следующих предпосылках. Древние захороненные сооружения и фундаменты, изготовленные из поделочного камня (известняки, доломиты), представляют собой акустически контрастные локальные неоднородности, расположенные в терригенных горных породах, и должны создавать аномалии в наблюдаемом волновом поле. Культурные слои, насыщенные продуктами человеческой деятельности, должны отличаться упругими модулями от нижележащих геологических слоёв. Это создаёт предпосылки для картирования поверхности раздела между культурным слоем и нижележащей геологической толщей [Степанов, Головцов, 2013].

Сейсморазведка может применяться и в целях военной археологии для поиска построек военного назначения, а также выявления характеристик ВЧР территории, на которой ведутся поисковые работы.

## Глава 3. Комплексные геофизические исследования.

### 3.1. Участок работ

Участок планируемых строительных работ представляет собой полосу вдоль берега Невы длиной 500 м и шириной 30 м (рис. 8). Перед выполнением строительных работ необходимо выявить представляющие опасность артефакты войны (неразорвавшиеся боеприпасы, предметы военной амуниции, техники и вооружения).



*Рисунок 8. Участок планируемых строительных работ*

Территория имеет сложный рельеф и сильно изрезана ямами, канавами и кочками. Со времён войны сохранились некоторые участки окопов, а также воронки, образовавшиеся в результате разрывов снарядов (рис. 9). Местность заросла высокой травой и кустами, вдоль берега наблюдается уступ, в некоторых частях достигающий высоты 9 метров. Так же на побережье растут деревья до 20 м высотой, представленные в основном березой и ольхой.



*Рисунок 9. Рельеф Невского пятка*

В 2020 году сотрудниками СПбГУ были подготовлены и опробованы опорные шурфы, а также расчистки для проведения геологической интерпретации верхней части разреза.

## 3.2. Фотограмметрия

### Методика проведения полевых работ

С целью создания топогеодезической основы был применён метод фотограмметрии с использованием квадрокоптера DJI Mavic 2 Pro (рис. 10 А).

Также были намечено 4 профиля по 450 м с шагом 3.5 м на террасе и 2 коротких профиля по 150 м с шагом 5 м в северной части участка у уреза воды для проведения пешей магниторазведки. Направление профилей с юга на север вдоль Невы. Привязка осуществлялась с применением GPS приёмника Garmin GPSmap 64 (рис. 10 Б) и высокоточного GNSS приёмника Sokkia GRX2 (рис. 10 В) совместно со специалистом топографом из «Геоскан».



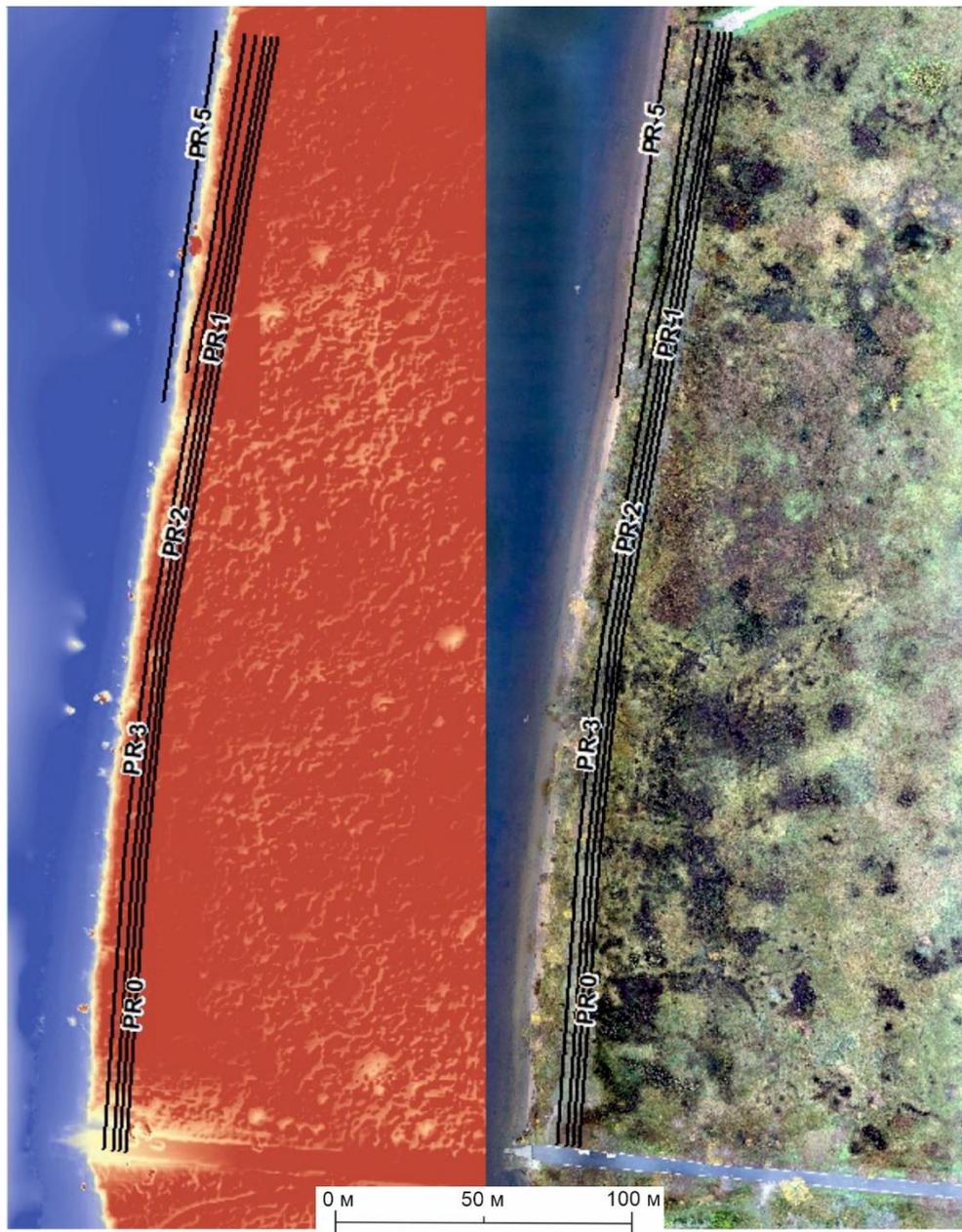
Рисунок 10. Используемая аппаратура: А - квадрокоптер DJI Mavic 2 Pro; Б - GPS приёмник Garmin GPSMAP 64; В - GNSS приёмник Sokkia GRX-2

### Методика обработки

Обработка результатов съемки местности с БПЛА выполнялась в ПО Agisoft Metashape и имела следующие основные этапы:

- Обработка массива снимков в ПО Adobe Lightroom для выравнивания цветов и освещения;
- Выравнивание снимков и построение разуплотненного облака точек;
- Вырезание из облака точек таких объектов как деревья, кусты и других объектов, которые могут вносить ошибки при расчете истинного рельефа местности;
- Построение плотного облака точек;
- Привязка снимков к реперным точкам с известными координатами, снятыми GNSS приёмником;
- Построение цифровой модели местности;
- Построение высококачественного ортофотоплана.

В результате выполнения вышеописанных этапов обработки были получены ортофотоплан и цифровая 3D модель рельефа, которые содержат в себе информацию о высотах и прямоугольных координатах любой точки участка (рис. 11).



*Рисунок 11. Цифровая модель рельефа и ортофотоплан с нанесением профилей*

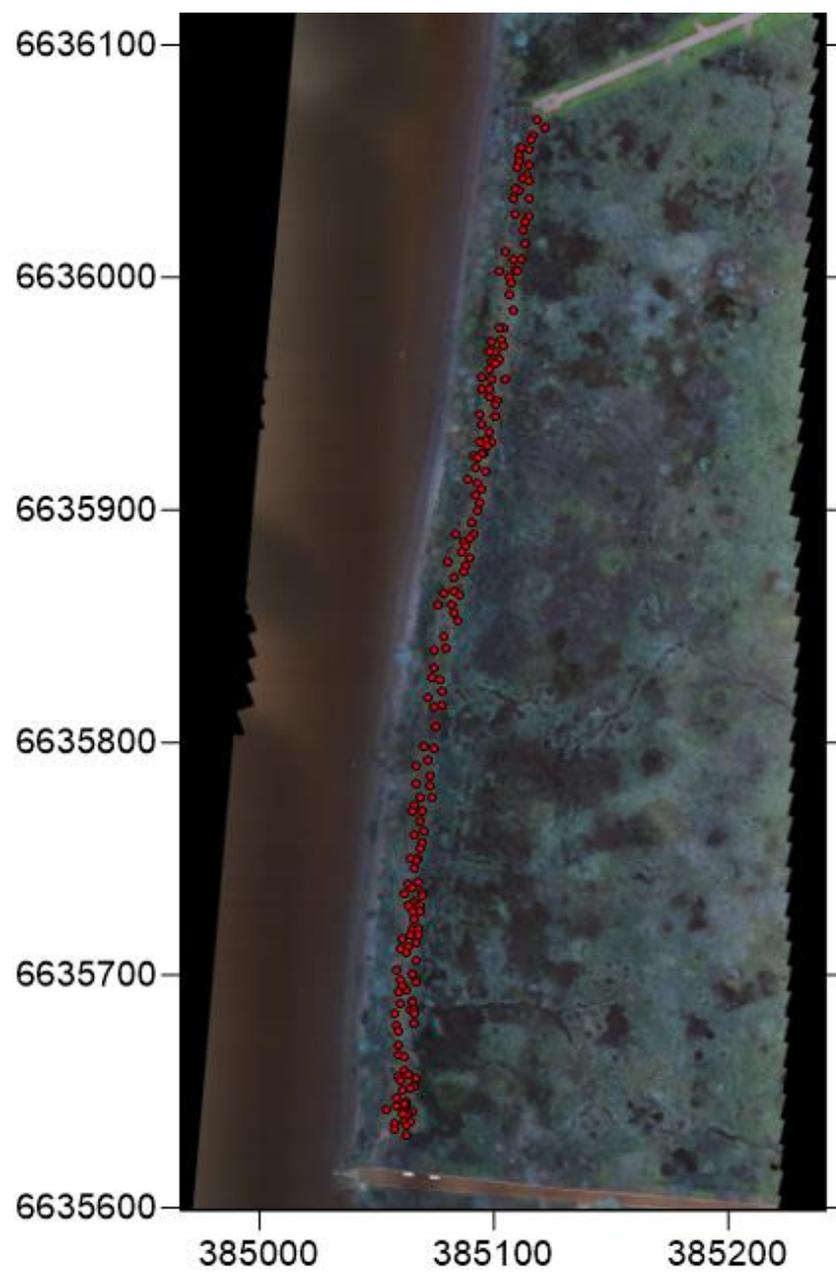
### 3.3. Металлодетектирование

Поиски металлических объектов выполнялись совместно со студентами кафедры геофизики Санкт-Петербургского Горного университета с использованием металлодетектора Minelab XTerra 505 (рис 12). Целью данного этапа являлось выявление преимущественно мелких металлических объектов на глубине до 30 см (такая глубина обусловлена предельной глубиной исследования данного металлоискателя).



*Рисунок 12. Вид металлоискателя Minelab XTerra 505.*

В местах отклика металлоискателя устанавливались флажки, координаты которых были сняты при помощи высокоточного GNSS приёмника Sokkia GRX2 (рис. 12). Всего было выявлено 240 металлосодержащих объектов, после чего все они были нанесены на топооснову (рис 13).



*Рисунок 13. Карта распределения точек металлодетектирования*

### 3.4. Магниторазведка

#### Методика проведения полевых работ

##### *Пешеходная съемка*

По ранее намеченной сети профилей, указанной на рисунке № 14 была проведена пешеходная магнитная съемка при помощи двух магнитометров ММПОС-1 (рис. 15), один из которых был установлен в качестве магнитовариационной станции, а вторым проводилась площадная съемка.



*Рисунок 14. Сеть профилей магниторазведке на ортофотоплане*

Параметры пешеходной съемки:

- 4 профиля по 450 м
- 2 профиля по 150 м
- Шаг между профилями 3 м
- Шаг по профилю 1 м
- Нормальное магнитное поле 52620 нТл



*Рисунок 15. Комплект магнитометра MMPOS-1*

### ***Аэромагниторазведка***

Сотрудниками ООО «НПП ВИРГ-Рудгеофизика» была проведена аэромагниторазведка. Использовался БПЛА DJI Matrice 600 и подвешенная гондола с магнитометром на основе MMPOS-1. (рис. 16)



*Рисунок 16. БПЛА DJI Matrice 600 и гондола-магнитометр на основе MMPOS-1*

Высота полета гондолы составляла 20 м над поверхностью, гондола подвешивалась на расстоянии 5 м под БПЛА. Был снят участок 200 на 500 м.



данных, то есть удаляются явные «отскоки», которые могут быть связаны с ошибкой оператора, техногенными помехами. Техногенные помехи отсекались еще в момент съемки, поскольку в используемом магнитометре ММPOS-1 есть встроенный фильтр 50Гц. После этой операции вводится ряд поправок.

Таким образом, обработка данных магниторазведки выполнялась в ПО Geosoft Oasis Montaj по следующему графу:

- 1) Подготовка таблиц Excel для данных, полученных с МВС и по площадной съемке и таблиц с координатами по каждому профилю;
- 2) Загрузка данных в программу с проектом;
- 3) Применение встроенного фильтра низких частот;
- 4) Присваивание измеренным значениям координат с помощью корреляции по времени;
- 5) Вычитание из значений измеренного поля вариаций магнитного поля Земли;
- 6) Расчет вертикального градиента магнитного поля с введением всех поправок;
- 7) Построение гридов, карт и карт графиков;
- 8) Визуализация в ПО «ArcMap» и «Surfer».

В подготавливаемых таблицах содержится информация о величине измеренного поля, дате, времени и рассчитанном времени с момента запуска первого GPS спутника в секундах, данный параметр был назван «GPSTIME». В отдельной таблице с координатами так же рассчитывается «GPSTIME». Это нужно для присваивания координат определенным точкам сбора данных.

#### **Поправка за вариации магнитного поля Земли.**

Из первичных данных удаляются вариации магнитного поля Земли, то есть вводится, так называемая, поправка за вариации. Для этого берутся данные полевой съемки и записи магнитовариационной станции.

Из учебного пособия К. В. Новикова (2013) следует, что на профилях измеренное значение  $T$  в некоторый момент времени  $t_n$  (или  $Z$ ) будет определяться формулой

$$T(t_n) = T_0 + T_m + T_e + T_a^{\text{пр/нк}} + \delta T(t_n),$$

а на МВС соответственно

$$T^{MBC}(t_n) = T_0 + T_m + T_e + T_a^{MBC} + \delta T(t_n).$$

Переменная составляющая  $\delta T(t_n)$  в некоторый момент времени  $t_n$  и нормальное поле будут практически одинаковыми для рядовых измерений и вариационной станции, тогда

$$\Delta T = T(t_n) - T^{MBC}(t_n).$$

Если МВС находится в спокойном поле, близком к нормальному, то  $T_a^{MBC} \rightarrow 0$ , то

$$T^{MBC}(t_n) = T_0 + T_m + T_e + \delta T(t_n)$$

А разность между значениями на исследуемом планшете и вариационной станции будет являться аномальным полем.

$$\Delta T_a = T(t_n) - T^{MBC}(t_n)$$

Если все же  $T_a^{MBC} \neq 0$ , то ее величина оценивается и  $\Delta T$  исправляется, чтобы получить  $\Delta T_a = \Delta T + T_a^{MBC}$

### **Учет влияния рельефа**

По К.В. Новикову (2013): «учет влияния рельефа необходим при магнитной съемке в районах с резко выраженным рельефом. Влияние рельефа особенно сильно в районах, сложенных сплошь магнитными породами. Ощутимо оно и при высокоточной магнитной съемки в условиях слабомагнитных и слабо дифференцированных по своим магнитным свойствам пород. Аномалии, вызываемые рельефом, можно называть ложными, поскольку они не отражают реального распределения намагниченности горных пород, а значит и геологического строения разреза».

В случае Невского пятачка, рельеф довольно сложный, с множеством мелких ям, кочек и частых перепадов высот в диапазоне 2 метров, однако он не приносит ощутимого влияния на форму аномалий ввиду того, что участок сложен слабомагнитными осадочными породами. Также, как известно, при увеличении высоты съемки уменьшается влияние рельефа и приповерхностных объектов на данные, что проиллюстрировано на рисунке 18, таким образом, данные, полученные в результате съемки с БПЛА практически лишены ложных аномалий, вызванных рельефом.

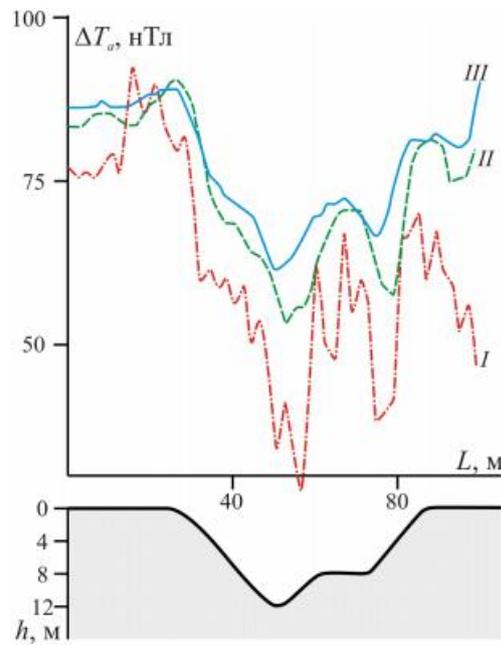


Рисунок 18. Магнитное поле  $\Delta T_{\sigma}$ , наблюдаемое над оврагом. Высота датчика: I – 1 м, II – 2 м, III – 3 м [Новиков, 2013]

### Результаты:

Таким образом, в результате проведения работ методом пешеходной магниторазведки была получена карта графиков (рис. 19) и карта аномального магнитного поля на участке Невский пятачок (рис. 20). Были наложены точки металлодетектирования и выделены аномальные зоны.

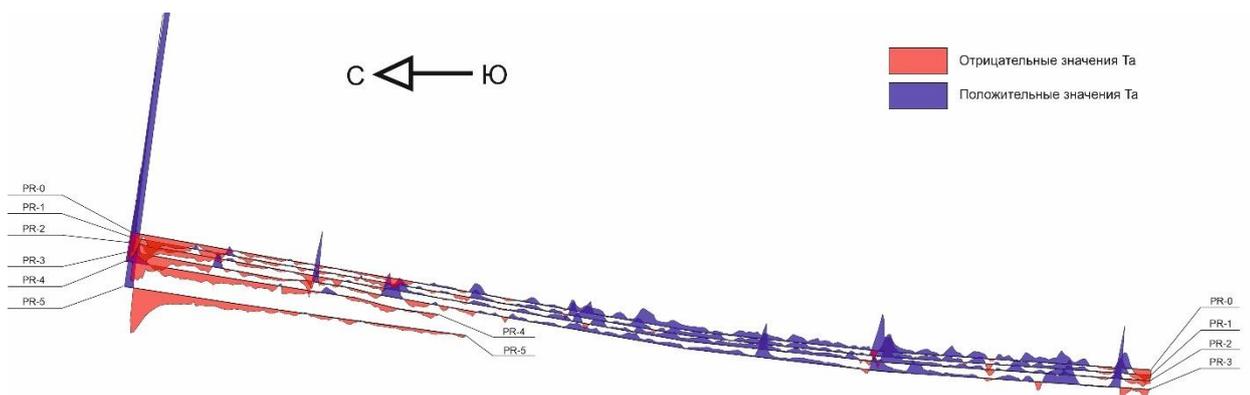
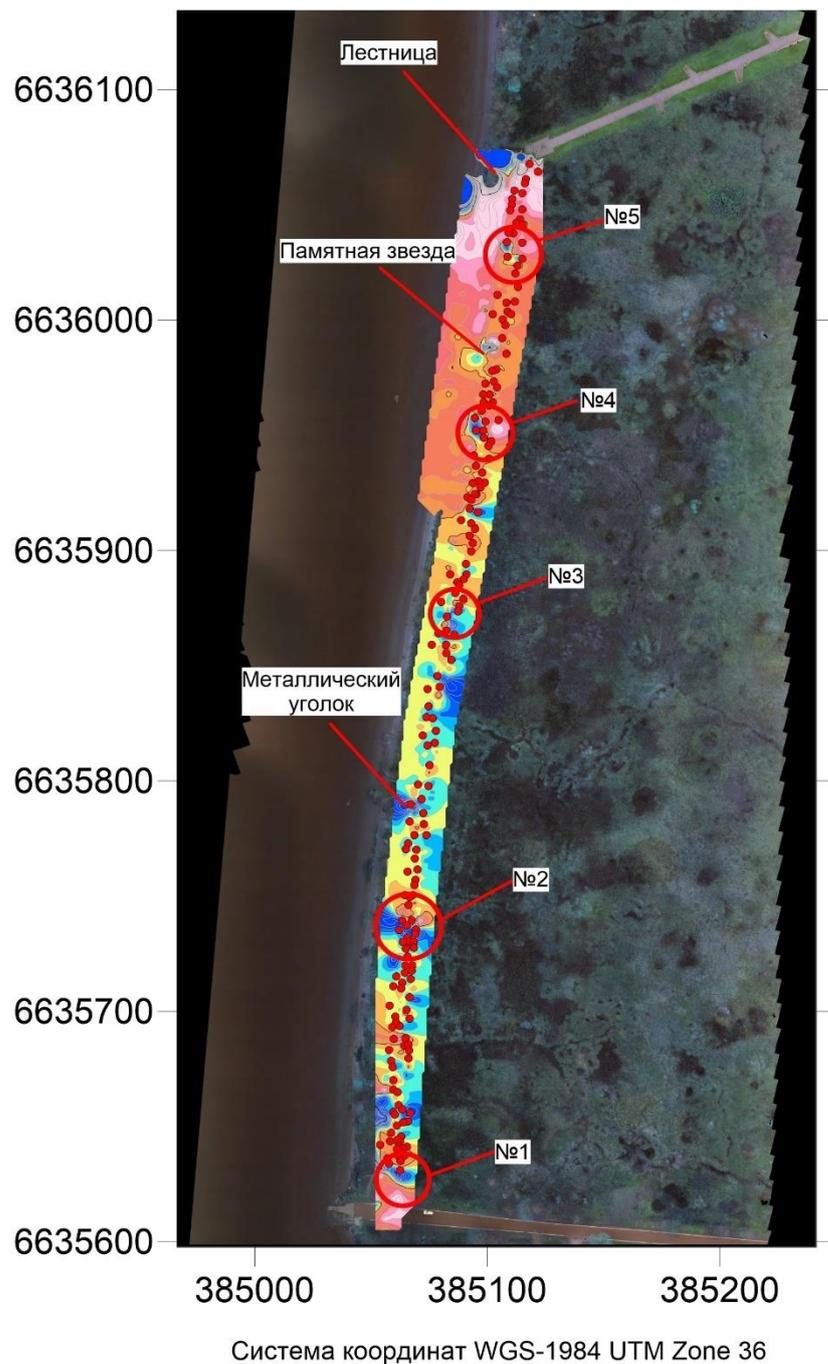


Рисунок 19. Карта графиков аномального магнитного поля по данным пешеходной магнитной съемки территории Невского пятачка



*Рисунок 20. Карта аномального магнитного поля территории Невского пятачка по данным пешеходной магниторазведки с выделенными аномальными зонами и нанесёнными точками металлодетектирования;*

Также были получены карты аномального магнитного поля и вертикального градиента магнитного поля по данным аэромагниторазведки (рис. 21).

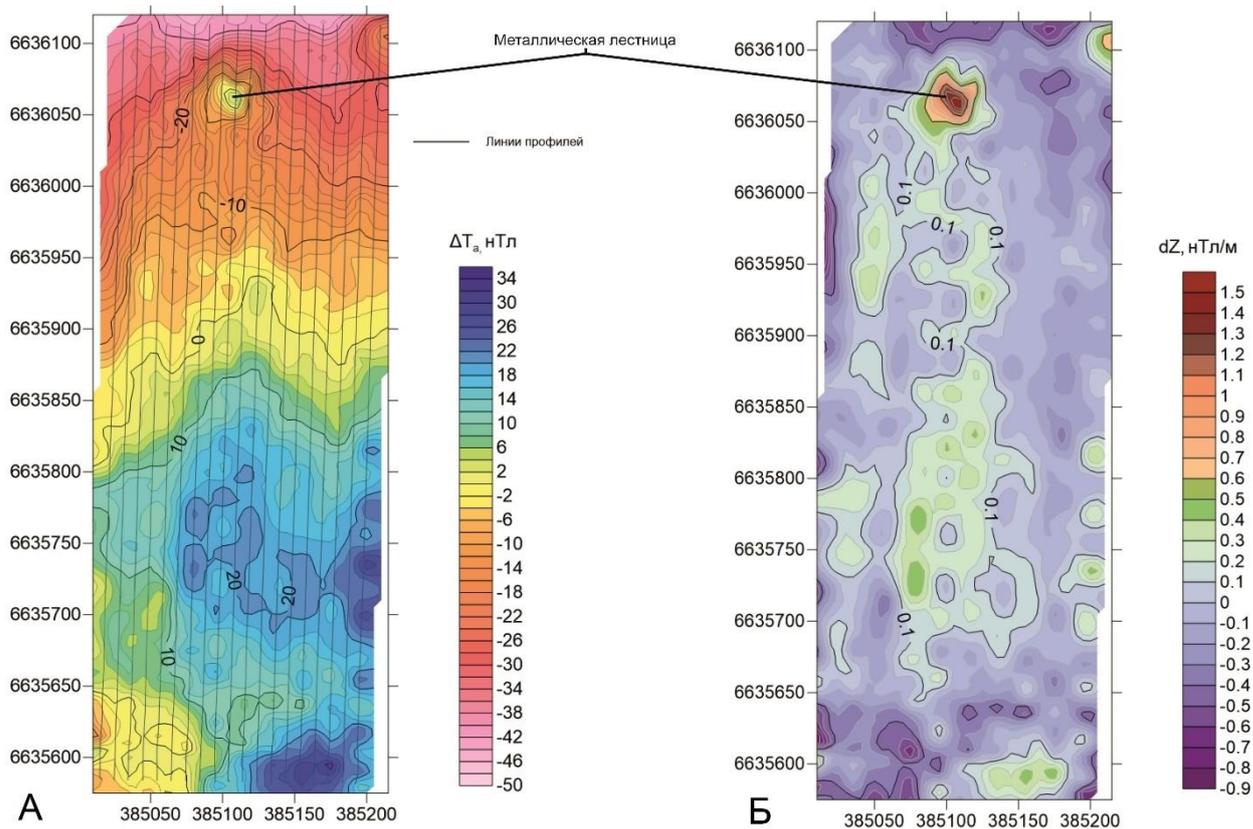


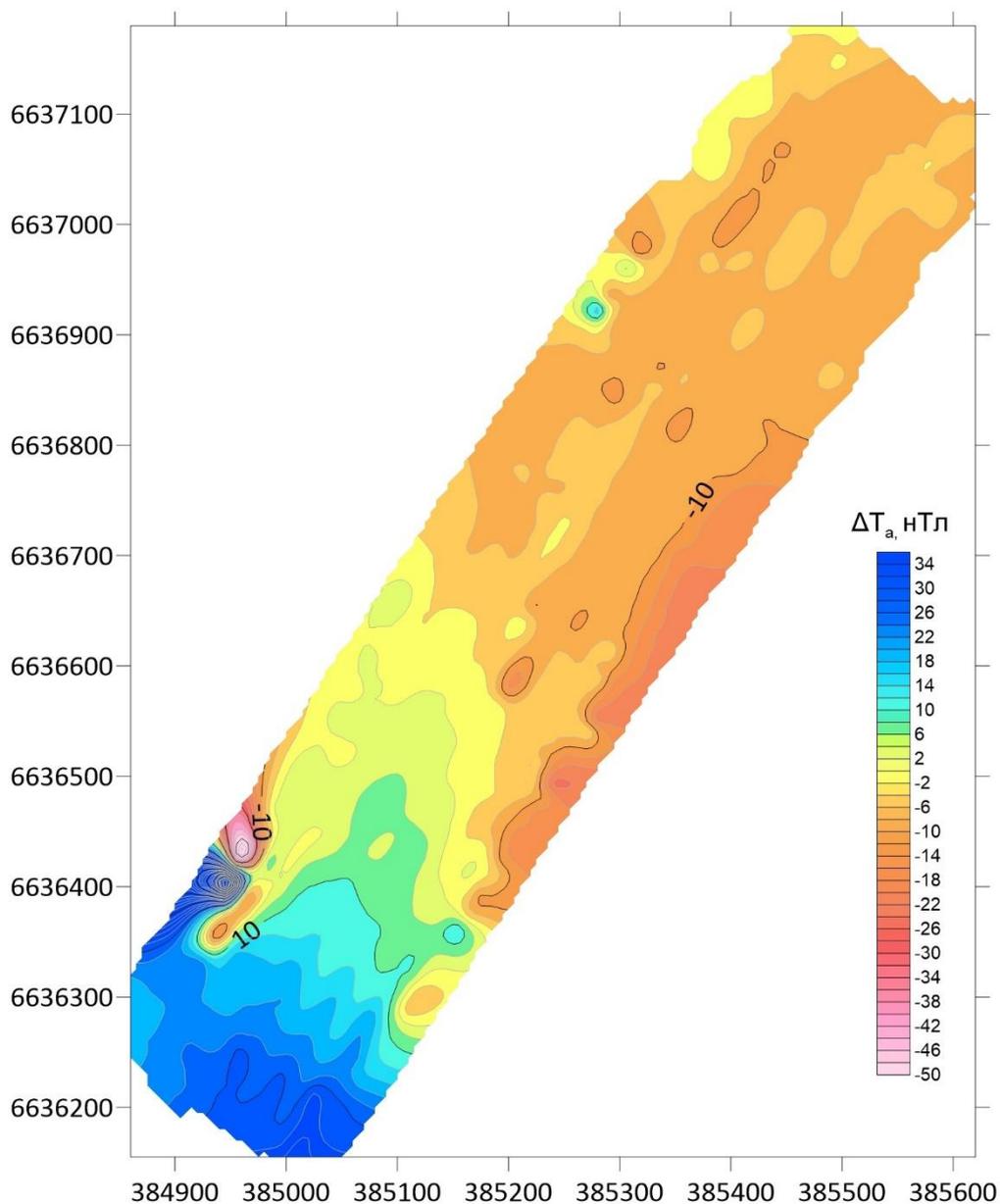
Рисунок 21. А – карта аномального магнитного поля территории Невского пятачка по данным аэромагниторазведки; Б – карта вертикального градиента магнитного поля территории Невского пятачка по данным аэромагниторазведки

В результате предварительного анализа данных материалов можно сделать следующие предварительные выводы:

- Данные пешеходной и аэросъемки хорошо коррелируют. На всех картах наблюдается тренд убывания поля от юга к северу;
- Выявлено 5 аномалий магнитного поля, предположительно соответствующие искомому подповерхностным объектам. Также наблюдаются аномалии, природа которых известна ввиду наличия на участке таких объектов как металлическая лестница, памятная звезда, металлический уголок и закладной мемориальный камень
- Ступенчатость точек металлодетектирования практически не коррелирует с зонами изменения магнитного поля.
- Данные полученные по результатам проведения аэромагниторазведки имеют более сглаженный характер ввиду значительно меньшего влияния приповерхностных объектов, однако выраженная аномалия от железной лестницы в северной части карты всё же наблюдается.

### Съемка над акваторией

В результате съемки над прилегающей к территории Невского пяточка акватории Невы была получена карта аномального магнитного поля (рис. 22).



*Рисунок 22. Карта аномального магнитного поля над прилегающей к Невскому пяточку акваторией Невы по данным аэромагниторазведки*

На данной карте наблюдается увеличение аномального магнитного поля в северо-восточном направлении. Также в юго-западной части карты обнаруживается высокоамплитудная аномалия.

### 3.5. Георадиолокация

#### Методика проведения полевых работ

При выполнении радарной съемки был использован георадар ОКО-2 с антенным блоком АБ-250 и частотой зондирующего импульса 250МГц (рис. 23). Данный радар имеет заявленную максимальную глубину исследования 8м и разрешающую способность 0,25м. В качестве регистрирующего устройства использовался ноутбук с установленным ПО «Geoscan32». Также, в качестве датчика перемещения использовалось колесо, идущее в комплекте георадара ОКО-2.



Рисунок 23. Комплект георадара ОКО-2 с АБ-250

Работы методом георадиолокации проводились в два этапа. На первом этапе были пройдены два профиля по 460м через весь участок работ для определения нормального геологического разреза. Второй этап включал в себя детальную съемку в перспективных зонах, выделенных по результатам проведения магниторазведки для выделения искомых подповерхностных объектов.

#### Методика обработки данных

Обработка полевых материалов выполнялась в ПО Geoscan32 согласно следующему графу:

1. Предварительная обработка: визуальная оценка, отбраковка, обрезание профиля по глубине и длине;
2. Учет положения радара, реверсирование профилей, усиление;
3. Подбор значений  $\epsilon$  по дифракциям;

4. Учёт координат по меткам пикетов и координатам, снятым с модели рельефа в ПО Геоскан Спутник;
5. Учёт рельефа по данным из цифровой модели ПО Геоскан Спутник;
6. Сравнение и корреляция георадиолокационных разрезов с геологическими;
7. Оформление и представление данных.

В ходе проведения полевых работ для каждого маршрута были получены сетки георадиолокационных разрезов, проинтерпретировав данные, с которых, необходимо было выделить непрерывные границы, получить информацию о глубине их залегания. После чего, следовало сопоставление георадиолокационных данных с геологическими разрезами и описаниями, поиск дифракций, подбор значений  $\epsilon$ . Также, важнейшей задачей было выделение зон с повышенным контрастом на глубину, которые характерны для железных подповерхностных объектов. Обработка радарных данных осуществлялась с использованием ПО «Geoscan32».

Первый этап, в первую очередь, включал в себя ввод координат. Было необходимо сопоставить разрезы с их положением на карте, используя для этого координаты точек начала и конца профилей с GNSS приемника, а также с данных, полученных в результате проведения фотограмметрии. Полезный сигнал подчёркивался при помощи и изменения профиля усиления.

Определение значений  $\epsilon$  выполнялось по дифракциям. В результате было получено, что среднее значение  $\epsilon$  равно 5. Стоит отметить, что на участке проведения работ были описаны шурфы и расчистки, в которых точно известна мощность тех или иных слоёв, что позволило опираться на априорные данные о мощностях и глубинах залегания тех или иных отложений.

Для выявления высококонтрастных зон, предположительно отвечающих железным подповерхностным объектам, проводилась визуальная оценка радарограмм и сопоставление с данными магниторазведки, а также с результатами проведения металлодетектирования.

### 3.6. Сейсморазведка

#### Методика проведения полевых работ

Работы методом сейсморазведки проводились сотрудниками кафедры геофизики Института наук о Земле СПбГУ под руководством В.В. Половкова по профилю PR-1 с 1 пикета по 12 (с 10 до 120 м) (рис. 24).



Рисунок 24. Профиль сейсморазведки на аэрофотоснимке

В качестве приёмного оборудования использовалась узловая бескабельная система GSX (производства Geospace Technologies Corporation). В качестве источника использовался удар 10 килограммовой кувалды по металлической подложке. Фиксация момента удара осуществлялась замыканием цепи между кувалдой, металлической подложкой и фиксирующим устройством (точность определения удара по UTC 6-10 мс). Шаг между приёмниками составлял 2 м, а между источниками – 2 или 1 м (по схеме на рис. 25). Использовалось пятикратное накопление для каждого источника.

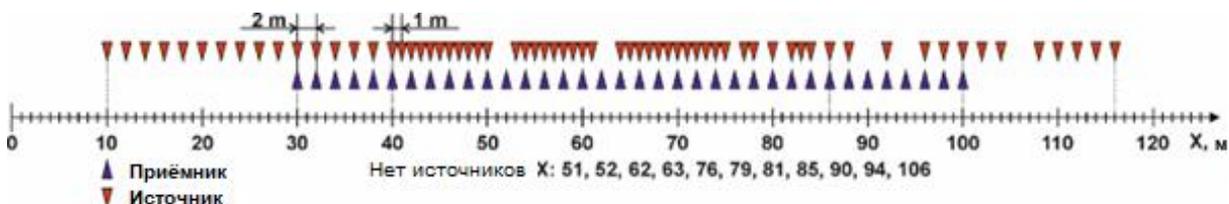


Рисунок 25. Схема ПП и ПВ, участвующих в обработке

#### Методика обработки данных

Обработка данных сейсморазведки проводилась сотрудниками кафедры геофизики Института наук о Земле СПбГУ по следующей методике. По полученным сейсмограммам сначала проводилась пикировка первых вступлений в программе RadExPro. Затем полученная пикировка была обработана в программе XТomo-LM для выполнения метода 2D томографии. Инверсия производилась в несколько этапов. На первом была задана исходная модель градиента, она имела размеры 126\*55 м с размером ячейки 1\*1. Значение скорости  $V_p$  варьировалось от 300 м/с (в верхней части модели) до 3000 м/с (в нижней части модели). После того, как в данную модель были введены поправки за рельеф, был выполнен алгоритм инверсии с большим значением параметра регуляризации. Полученная в результате этого модель использовалась для построения новой исходной модели путем экстраполяции от центра модели к её краям. Далее инверсия выполнялась трижды с уменьшением параметра регуляризации. Результатом инверсии стала скоростная модель  $V_p$  (рис 26, вверху). Поднятие высокоскоростных отложений наблюдается в левой части разреза, также может быть обнаружена небольшая аномалия скорости на 60-75 м от начала профиля на глубине 10 м.

Обработку данных методом MASW проводили в программе RadExPro следующим образом. Сначала сейсмограммы были разделены на правую и левую ветви годографа, использовался простой полосовой фильтр 4-5-10-15 Гц, а также применялся верхний и нижний мьютинг (230 м/с и 70 м/с с задержкой 350 мс). В качестве базы наблюдений использовались расстояния от 4 м. Дисперсионные изображения рассчитывались по подготовленным сейсмограммам со следующими ограничениями: значения фазовой скорости от 0 до 1000 м/с, интервал частот до 20 Гц, шаг по частоте 0,5 Гц. Дисперсионные изображения с сейсмограмм с малым количеством трасс (менее 4) не учитывались. Выделение основной моды поверхностной волны производилось в полуавтоматическом режиме с последующим сглаживанием. Для проведения инверсии была взята 8-слойная модель с глубиной полупространства 40 м. Значение плотности 2 г/см<sup>3</sup>, значение коэффициента Пуассона 0,35. Было использовано 5 итераций. Так как база наблюдений давала повторяющиеся средние точки наблюдений, мы отфильтровывали «лишние» точки наблюдения. В таких случаях дублирования исключались сейсмограммы, которые давали дисперсионные кривые плохого качества и как следствие аномальные значения на скоростной модели. Результатом инверсии является скоростная модель  $V_s$  (рис. 26, внизу). Поднятие высокоскоростной среды также наблюдается в левой части разреза, что коррелирует с моделью  $V_p$  (рис. 26, вверху), но аномалия более низкой скорости не видна в скоростной модели  $V_s$ . Это можно объяснить

наличием среды с повышенной пористостью относительно окружающей среды при сохранении упругих свойств скелета.

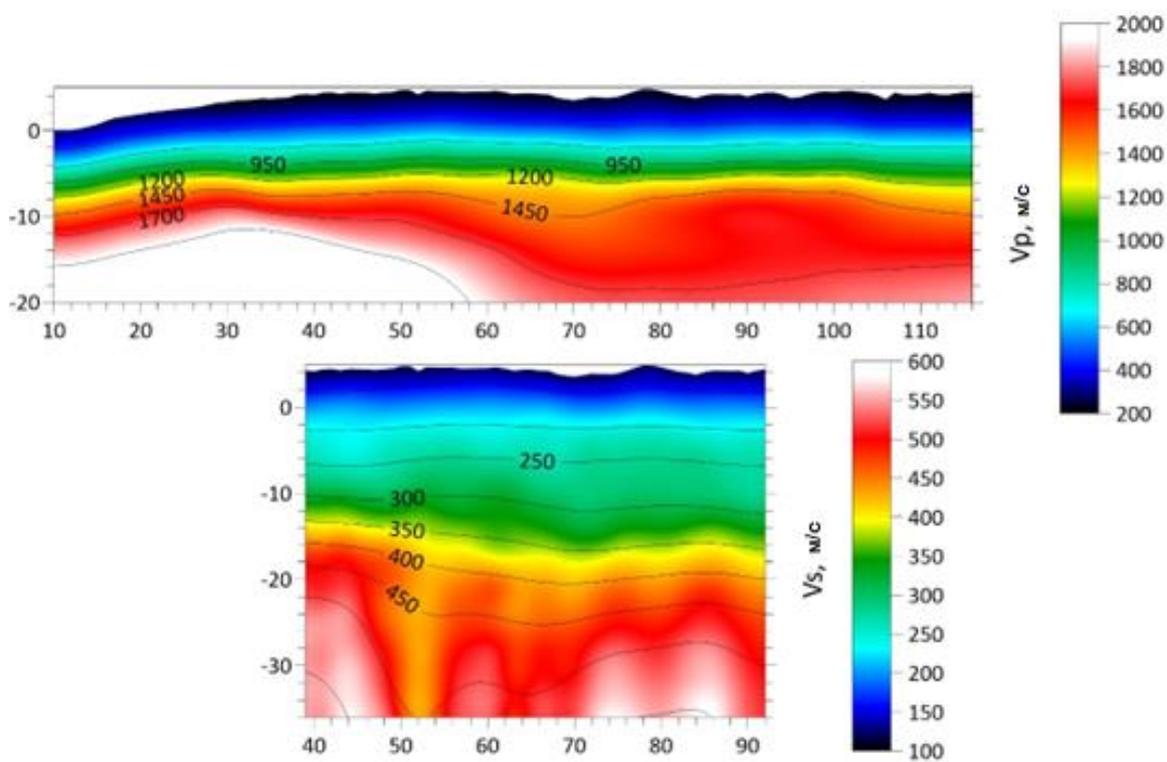


Рисунок 26. Сверху – скоростная модель  $V_p$ ; снизу – скоростная модель  $V_s$

## Глава 4. Интерпретация данных

### 4.1. Определение нормального геологического разреза

#### Геологическое описание

В 2020 году сотрудниками СПбГУ и «ВСЕГЕИ» под руководством М.В. Шитова, были подготовлены и опробованы опорные шурфы и расчистки для проведения геологической интерпретации верхней части разреза:

Точка наблюдения ТН НП-19-01 была расположена на левом берегу р. Нева в ее верхнем течении, в 191 м выше асфальтовой дороги, ведущей к мемориалу "Невский Пятачок". В береговом обрыве высотой 6,0 м от уреза воды расчисткой был вскрыт следующий разрез (снизу вверх):

1. глинистые алевриты зеленовато-серого цвета с преимущественно горизонтальной, а в верхней части - тонкой, слабо волнистой слойчатостью; мощность слоев в сериях составляет от 1 до 3 мм; в кровле пачки фиксируется бурый алевритистый прослой с небольшой примесью мелкозернистого песчаного материала мощностью 2 см; граница пачки неровная, волнистая; контакт с вышележащими отложениями несогласный, размывтый, подчеркивается маломощным (до 0,5 см) ожелезненным прослоем; видимая мощность - 0,9 м (абсолютная отметка кровли - 4,4 м);

2. преимущественно мелкозернистые пески цвета от рыжевато-коричневого и рыжего в нижней части пачки до светло-бежевого - в верхней; общая мощность пачки - 2,15 м (6,55 м абс.); снизу вверх по разрезу по структурно-текстурным особенностям пачку можно разделить на три части: а) мелко- и среднезернистые пески ярко-рыжего и рыжевато-коричневого цвета мощностью 0,7 м с горизонтальной, местами - с полого волнистой слойчатостью; мощность слоев варьирует от нескольких мм до 1 см; пески сильно ожелезненные: по всей мощности этой части пачки фиксируются тонкие линзы темно коричневого, почти черного цвета гидроокислов железа, которые представляют собой мелкие вкрапленники диаметром до 1-2 мм; б) коричневато-бежевые мелкозернистые алевритистые пески мощностью 0,75 м со слойчатостью типа "восходящей ряби": наклон слоев в данной части пачки совпадает с направлением современного течения р. Нева, а слои в косых сериях (мощностью в первые мм) подчеркиваются прослоями темноцветных минералов; амплитуда косых серий с "восходящей рябью" достигает 50 см, а их протяженность - до 1 м; в) тонкозернистые

светло-бежевые пески мощностью 0,2 м с волнистой слойчатостью, в которой гребень волны наклонен вниз по течению р. Нева, ограничивающиеся двумя тонкими алевроглинистыми прослоями голубовато-серого цвета мощностью 1-2 см; г) бежевые и коричневатые-серые мелкозернистые пески с разнообразной слойчатостью: типа "восходящей ряби", волнистой, линзовидной и флазерной мощностью 0,5 м; снизу вверх по всей мощности пачки фиксируются небольшие ступенчатые сбросы и взбросы, амплитуда которых составляет от 1 до 5 см; контакт с вышележащими осадками несогласный, с отчетливым размывом и затеками глинистого материала из пачки 3;

3. глины и глинистые алевриты серого цвета, неяснослоистые, без обломочного материала, по всей мощности которых (мощность - 0,25 м; абсолютная отметка кровли - 6,8 м), наблюдаются пятна ожелезнения; граница с вышележащей пачкой резкая, контакт несогласный, размывтый;

4. погребенный торф видимой мощностью 0,2 м, который на всю мощность был вскрыт в 7 м выше по течению в ТН НП-19-02.

Следующая точка наблюдения ТН НП-19-02 расположена на левом берегу р. Нева, в 7 м выше по течению от ТН НП-19-01, в 198 м выше асфальтовой дороги, ведущей к мемориалу "Невский Пятачок". В береговом обрыве высотой 6,5 м расчисткой в 2,8 м от уреза воды (3,5 м абс.) была вскрыта толща отложений (снизу вверх):

1. мелко - и среднезернистые пески светло-бежевого цвета видимой мощностью 0,1 м (отметка кровли - 6,4 м абс.); кровля отчетливо размывта, фиксируются затеки глинистого материала из пачки 2; граница волнистая, контакт несогласный;

2. глинистые алевриты серо-голубого цвета мощностью 0,5 м (6,9 м абс.), неслоистые, с линзами и тонкими волнистыми прослоями средне- и крупнозернистого песка, ожелезненными по краям; граница с вышележащей пачкой постепенная, градиентная, т.к. в кровле развита погребенная почва (пачка 3);

3. палеопочва буровато-коричневого цвета мощностью 0,1 м (абсолютная отметка кровли - 7,0 м), контакт с вышележащими отложениями постепенный;

4. торф общей мощностью 1,5 м (абсолютная отметка кровли составляет 8,5 м), в котором по составу и текстурным особенностям можно выделить три части: а) темно-коричневый торф с отчетливо прослеживающейся горизонтальной слойчатостью, хорошо разложившийся, скорее всего, травянистый; мощность - 0,2 м; б) торф черного

цвета мощностью 0,5 м с горизонтальными, а местами мелко волнистослоистыми прослоями светло-бежевого мелкозернистого песка мощностью от 1 до 3 см; в) торф черного цвета, хорошо разложившийся, в котором фиксируется горизонт биотурбаций (мощностью 8-10 см), более светлый, чем остальной торф; в кровле наблюдаются многочисленные остатки древесины; мощность - 0,8 м; граница с вышележащей пачкой резкая, контакт несогласный;

5. переслаивающиеся мелкозернистые пески и алевриты светло-бежевого, голубовато-серого цвета общей мощностью 1,5 м (10,0 м абс.); пачка представляет собой перемятую толщу отложений с нарушенными текстурами, что, вероятно, может быть связано с активными боевыми действиями в этом районе во времена Великой Отечественной войны.

Таким образом, по данным описаниям был построен схематический разрез (рис. 27).

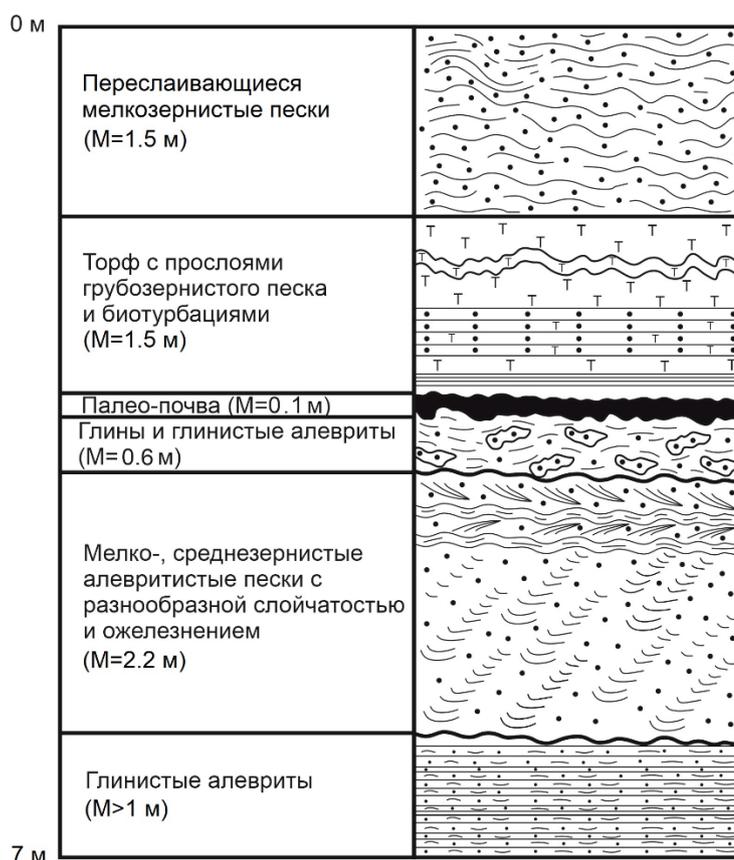
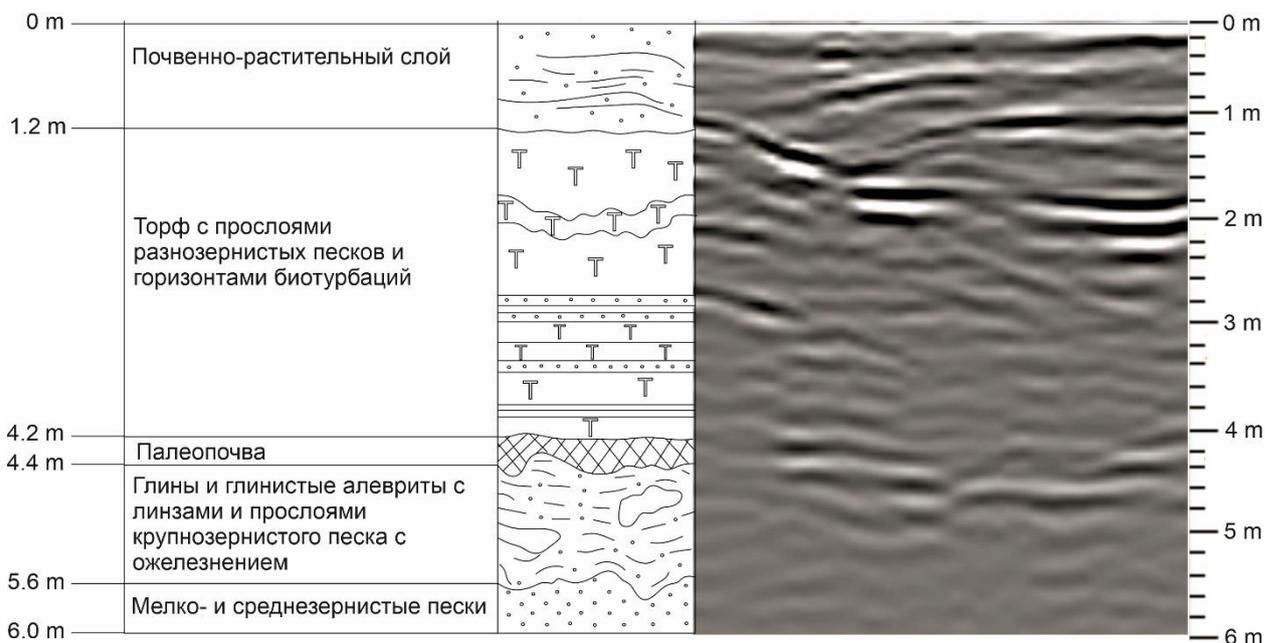


Рисунок 27. Схематический геологический разрез на территории Невского Пятачка

### Георадиолокация

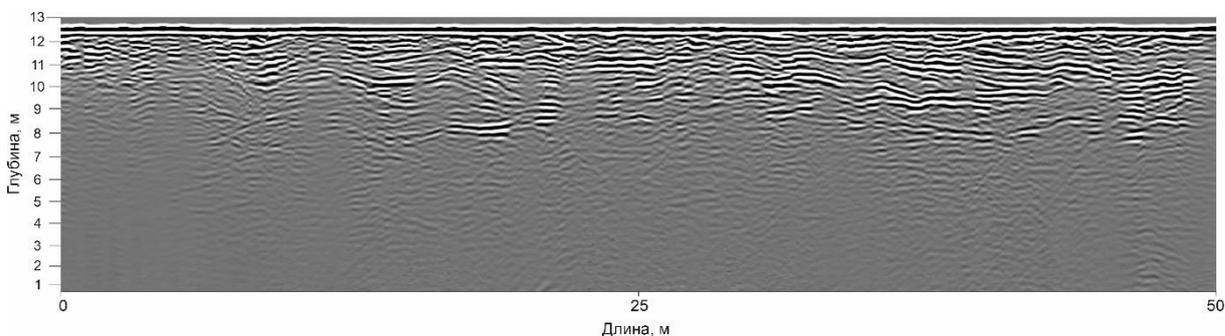
Георадарные исследования вместе с геологическим описанием верхней части разреза участка работ позволили определить геологический разрез данной территории.

В первую очередь, по дифракционным гиперболам было подобрано значение эpsilon, равное 5., благодаря чему получены корректные значения глубин. Далее была проведена корреляция геологического разреза, построенного по расчистке террасы и радарограммы, полученной в результате съемки непосредственно над расчисткой (рис 28).



*Рисунок 28. Сопоставление схематического геологического разреза (слева) и радарограммы (справа)*

По этим данным можно судить о выделении нескольких отражающих горизонтов. Первым таким горизонтом является кровля торфа ввиду своей большей водонасыщенности, вторым горизонтом является граница прослоя палеопочв с подстилающими глинами и глинистыми алевролитами. Данные границы прослеживаются на радарограмме практически на длину всего профиля (рис. 29).



*Рисунок 29. Участок профиля с ярко выраженными отражающими горизонтами*

Также это исследование подтвердило, что самая верхняя часть геологического разреза (до 1,5 - 2м) сильно неоднородна.

## Сейсморазведка

Как упоминалось ранее, на скоростной модели  $V_p$  (рис 26,верху), в левой части разреза наблюдается поднятие высокоскоростных отложений, также может быть обнаружена небольшая аномалия скорости на 60-75 м от начала профиля на глубине 10м.

По скоростной модели  $V_s$  также наблюдается поднятие высокоскоростной среды, что коррелирует с моделью  $V_p$  (рис. 26,верху), но аномалия более низкой скорости не видна в скоростной модели  $V_s$ . Это можно объяснить наличием среды с повышенной пористостью относительно окружающей среды при сохранении упругих свойств скелета. Если обратиться к результатам георадиолокации и геологическим описаниям можно судить о том, что более резкий переход к высокоскоростным слоям на уровне 4-5 м может соответствовать переходу от более пористого и менее плотного торфа к плотным глинам и глинистым алевритам. На рисунке 30 представлена сводная графика по всем используемым методам на данном этапе. Разрезы, представленные на данном рисунке, соответствуют данным по профилю «PR-1» в диапазоне от 10 до 120 м.

Таким образом, в результате данного этапа различными методами был определен нормальный геологический разрез на территории Невского пятачка.

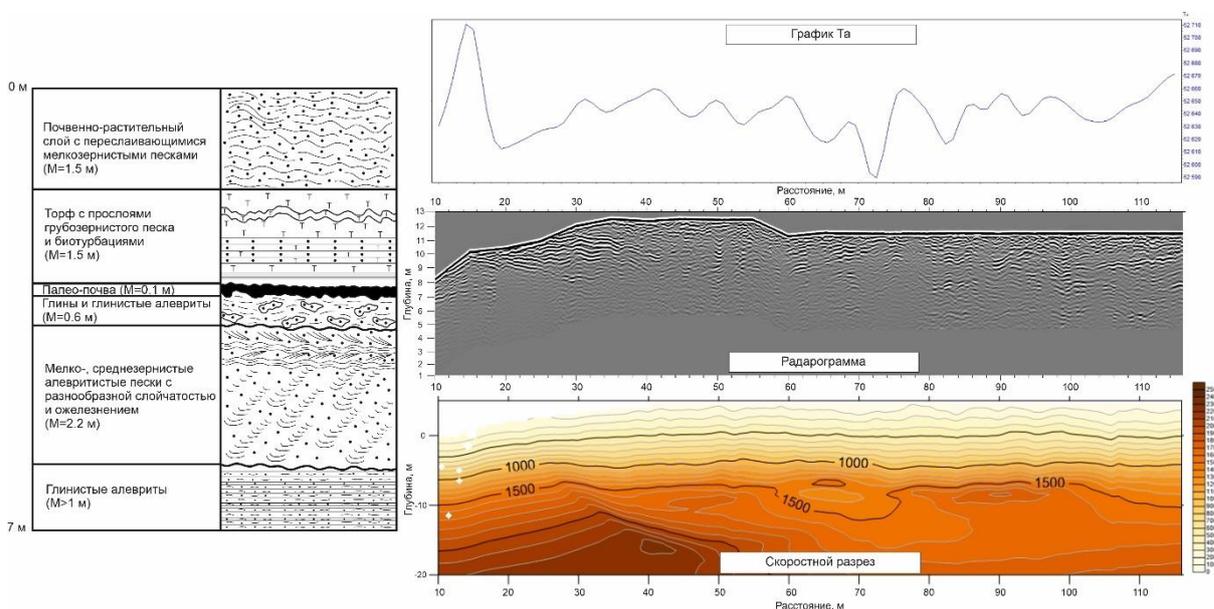


Рисунок 30. Сопоставление геологического разреза (слева) и данных, полученных в результате сейсморазведки (снизу), георадиолокации (посередине) и магниторазведки (сверху)

## 4.2. Определение источников геофизических аномалий и оценка параметров аномалообразующих объектов

Как уже упоминалось ранее, по результатам магниторазведки были выделены аномалии, которые впоследствии были разделены на 2 группы (рис 20): аномалии от известных объектов (визуально наблюдаемых на поверхности) и аномалии неизвестной природы от предполагаемых подповерхностных объектов.

### Решение обратных задач для тел простой формы.

Под телами простой формы подразумевают тела, геометрия которых описывается простыми функциональными зависимостями, например шар, круговой или эллиптический цилиндр, вертикальный или горизонтальный пласт бесконечного простираения и т.д. Для тел простой формы характерны относительно несложные выражения для аномального поля [Новиков, 2013]. Поскольку искомые тела обладают небольшими размерами их можно аппроксимировать точечными объектами. В данном случае за форму аномалообразующего объекта был принят шар.

Магнитное поле шара совпадает с полем диполя, поэтому его можно определить как поле двух точечных сближенных магнитных масс разных знаков, расположенных в центральной части шара. Ось диполя ориентирована по направлению намагничивающего поля. Тогда поле шара можно представить как поле стржня бесконечно малого диаметра с высотой  $\Delta h$ , равной расстоянию между магнитными массами [Новиков, 2013].

Как описывает К.В. Новиков (2013) в своем учебном пособии: для вертикально намагниченного стржня, ограниченного на глубину, верхняя граница которого находится на глубине  $h_1$ , а нижняя – на глубине  $h_2$  справедливо:

$$Z = B_z = \frac{\mu_0}{4\pi} m \left[ \frac{h_1}{(h_1^2 + x^2)^{3/2}} - \frac{h_2}{(h_2^2 + x^2)^{3/2}} \right],$$
$$H = B_H = -\frac{\mu_0}{4\pi} m \left[ \frac{x}{(h_1^2 + x^2)^{3/2}} - \frac{x}{(h_2^2 + x^2)^{3/2}} \right].$$

Воспользуемся формулой Тейлора:

$$B_Z(x, h + \Delta h) = B_Z(x, h) + \Delta h \frac{\partial B_Z(x, h)}{\partial h},$$

$$B_H(x, h + \Delta h) = B_H(x, h) + \Delta h \frac{\partial B_H(x, h)}{\partial h}.$$

Дифференцируя по  $h$  и отмечая, что  $m\Delta h = M$  – магнитному моменту шара, получим:

$$Z = B_Z = \frac{\mu_0 M (2h^2 - x^2)}{4\pi (h^2 + x^2)^{5/2}}, \quad H = B_H = -\frac{\mu_0 3Mhx}{4\pi (h^2 + x^2)^{5/2}},$$

где  $M = m\Delta h$  или  $M = JV = 4/3\pi R^3 J$  – магнитный момент шара.

$$T = B_T = \frac{\mu_0 M \sqrt{4h^2 + x^2}}{4\pi (h^2 + x^2)^4},$$

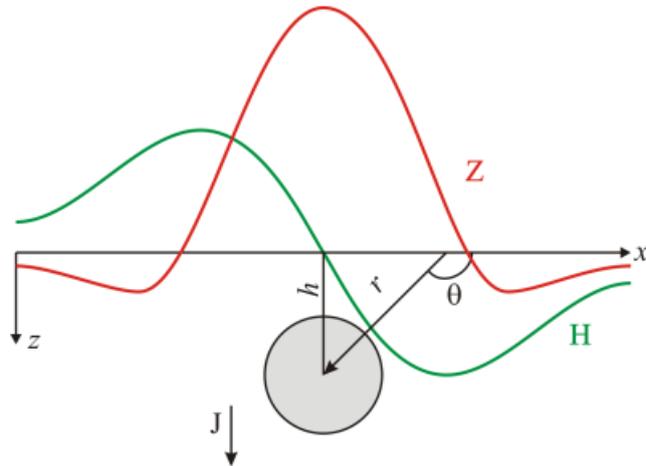


Рисунок 31. Вертикально намагниченный шар [Новиков, 2013].

Решение обратной задачи заключается в нахождении параметров объекта по распределению магнитного поля. Искомый параметр – глубина залегания центра шара. При решении используется метод характерных точек. Исходя из приведенных формул можно заключить, что кривая  $Z_a$  имеет максимум в точке  $x=0$ . Если  $Z_a=0$ , то в ноль должен обращаться числитель  $M\sqrt{4h^2 - x^2} = 0$ , при этом момент обращаться в ноль не может, а значит получаем:

$$h = \frac{x_0}{\sqrt{2}}$$

Таким образом, используя данное выражение можно рассчитать глубину залегания объекта от уровня съемки (высота измерителя над землей равна 2 м).

## Объект №1

Первый предполагаемый объект находится в промежутке 15-20 метров от начала профиля. Решив обратную задачу для шара, было получено, что данный объект должен залегать на глубине около 1,7 м. Амплитуда аномального магнитного поля составляет 50 нТл, что хорошо отражено на графике. Также была выполнена инверсия в программе «ZondGM2D» (рис. 32). Параметры инверсии указаны на рисунке 33, для всех дальнейших расчётов они не изменялись.

Был учтён рельеф, а также магнитное наклонение, которое составляет  $70^\circ$  для данного региона. По полученной модели видно, что центр аномалообразующего объекта расположен в 17 метрах от начала профиля «PR-1» на глубине 2 метра, что коррелирует с расчётами, проведенными ранее. По георадарному разрезу данного участка профиля искомый объект не выделяется, однако прослеживаются описанные ранее отражающие горизонты.

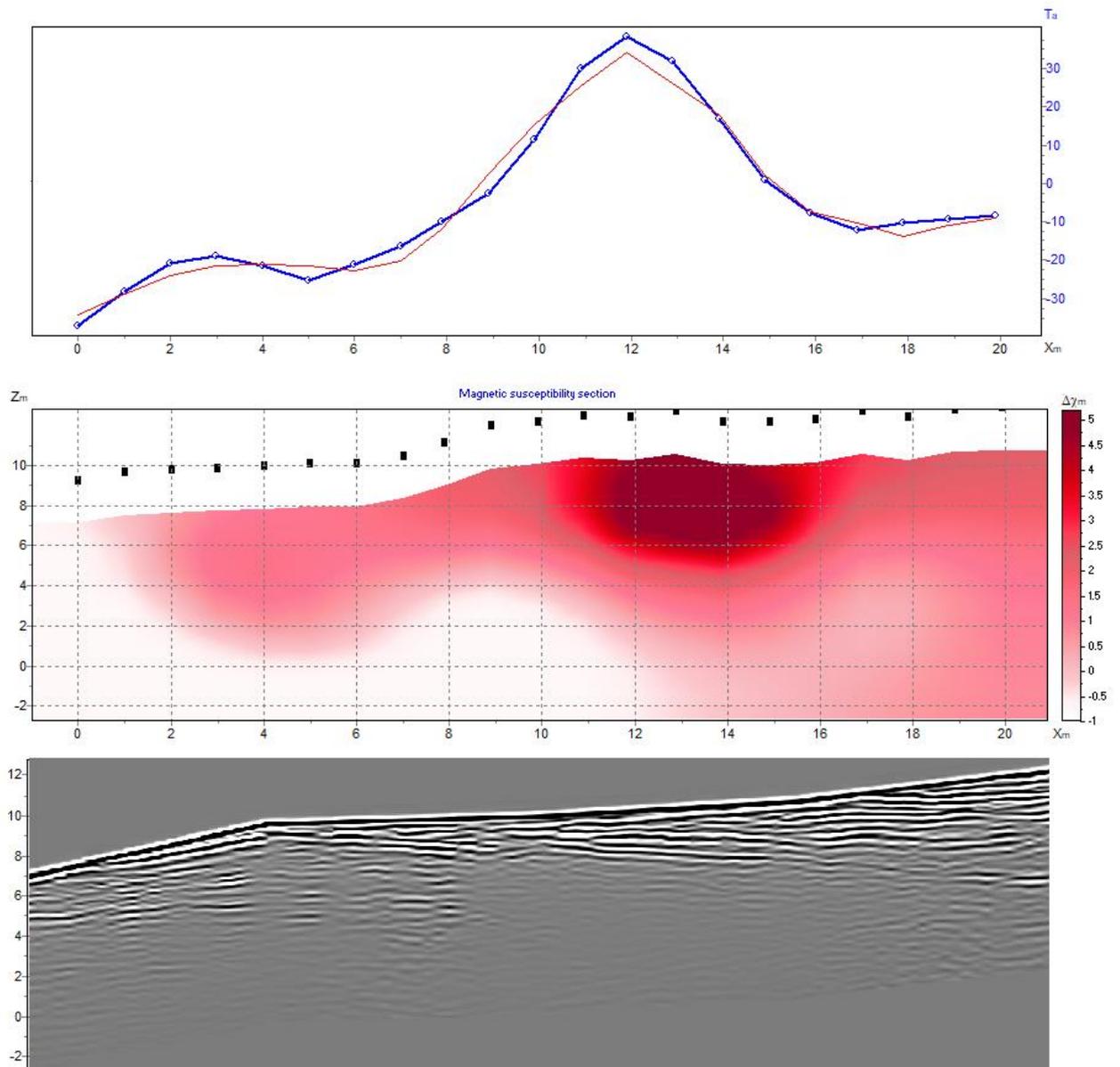


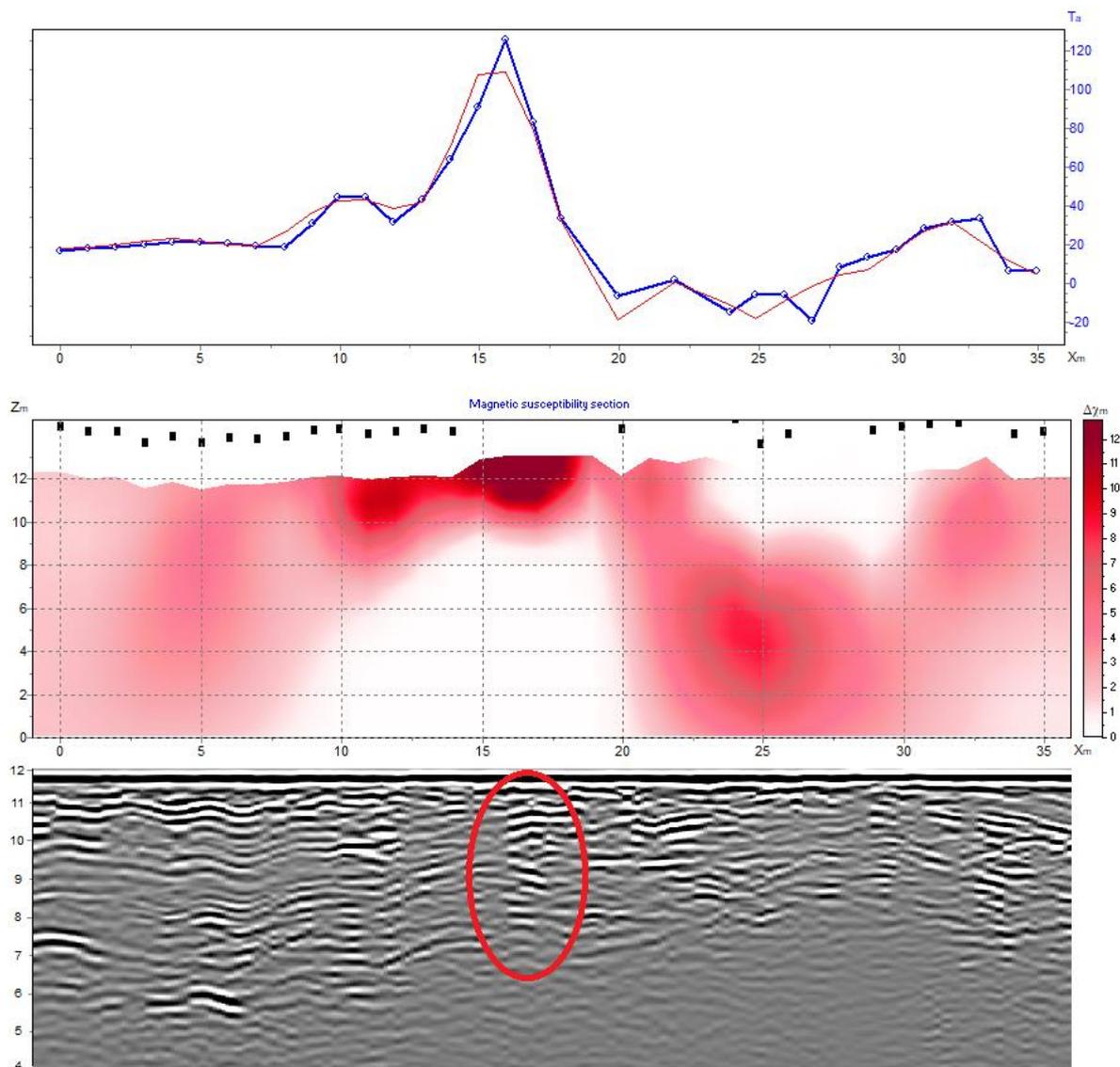
Рисунок 32. Объект №1: график аномального магнитного поля (синим – измеренное магнитное поле, красным – рассчитанное магнитное поле от модели) (сверху); модель, полученная в результате инверсии (посередине); георадарный разрез (снизу).

<b>Модель</b> Мин плотность: -1.0 Макс плотность: 1.0 Мин маг.воспр: -1.0 Макс маг.воспр: 100.0 Сглаживание: 0.5		Инверсия: Оккам Фактор гладкости: 0.1 Сглаж с глубиной: 0.00	<b>Остановка</b> <input checked="" type="checkbox"/> Итерации: 10 <input type="checkbox"/> Ошибка: 0.1
		<b>Фокусирующие параметры</b> Предел: 0.010	Компактность: 0.10
		Группирование: <input checked="" type="checkbox"/>	

*Рисунок 33. Параметры, используемые при инверсии*

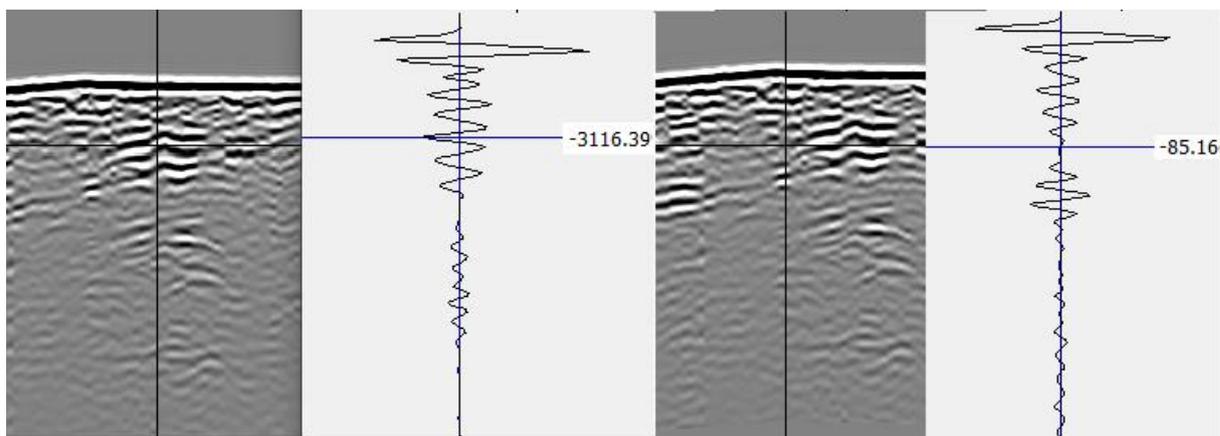
### **Объект №2**

Второй зоне, выделенной по результатам магниторазведки соответствует аномалия с амплитудой 120 нТл (рис. 34). Данный участок расположен в 105 м от начала профиля «PR-2». Аналогичным образом были проведены расчеты, в результате которых была получена глубина залегания аномалообразующего объекта, равная 0,4 м. Также была выполнена инверсия и получена модель (рис. 34).



*Рисунок 34. Объект №2: график аномального магнитного поля (синим – измеренное магнитное поле, красным – рассчитанное магнитное поле от модели) (сверху); модель, полученная в результате инверсии (посередине); георадарный разрез с выделенной областью «звона» (снизу).*

По данной модели глубина объекта составляет первые дециметры, до полуметра. На радарограмме наблюдается характерная достаточно широкая зона «звона», которая может соответствовать искомому металлическому объекту. Если обратиться к значениям амплитуды отражений в зонах «звона», то можно наблюдать увеличение амплитуды относительно «спокойных» областей разреза более чем на порядок (рис. 35).



*Рисунок 35. Сравнение высоко- и низкоамплитудных отражений*

### **Объект №3**

Третья зона расположена в диапазоне с 240 до 265 м от начала профиля «PR-1» и на ней выделяются две аномалии с амплитудой 40 и 50 нТл соответственно. Проведя аналогичные действия, было выявлено, что первый предполагаемый объект залегает на глубине около 1 м, второй располагается практически на поверхности, либо на небольшом заглублении. На радарограмме выделяются две зоны с характерным «звоном», соответствующие представлениям о расположении данных объектов (рис. 36).

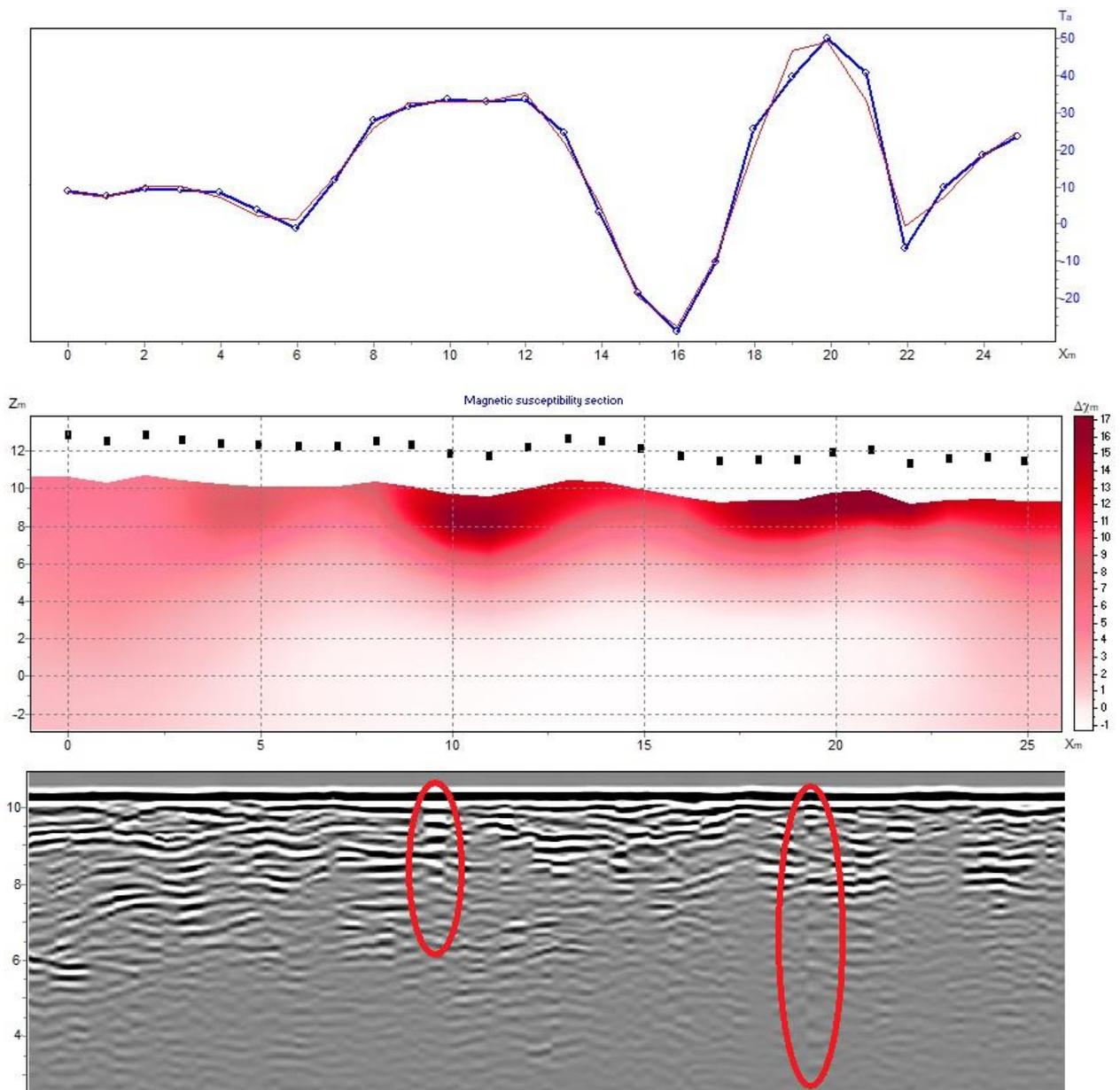


Рисунок 36. Объект №3: график аномального магнитного поля (синим – измеренное магнитное поле, красным – рассчитанное магнитное поле от модели) (сверху); модель, полученная в результате инверсии (посередине); георадарный разрез с выделенными высококонтрастными зонами (снизу).

#### Объект №4

Четвертый аномалообразующий объект находится в диапазоне от 320 до 350 м от начала профиля «PR-3» и создает аномалию с амплитудой 75 нТл. Как по результатам расчётов, так и по инверсии было выявлено, что данный объект расположен на 2 м по глубине. По радарограмме в этом месте выделяется гипербола дифракции, предположительно соответствующая искомому объекту (рис. 37).

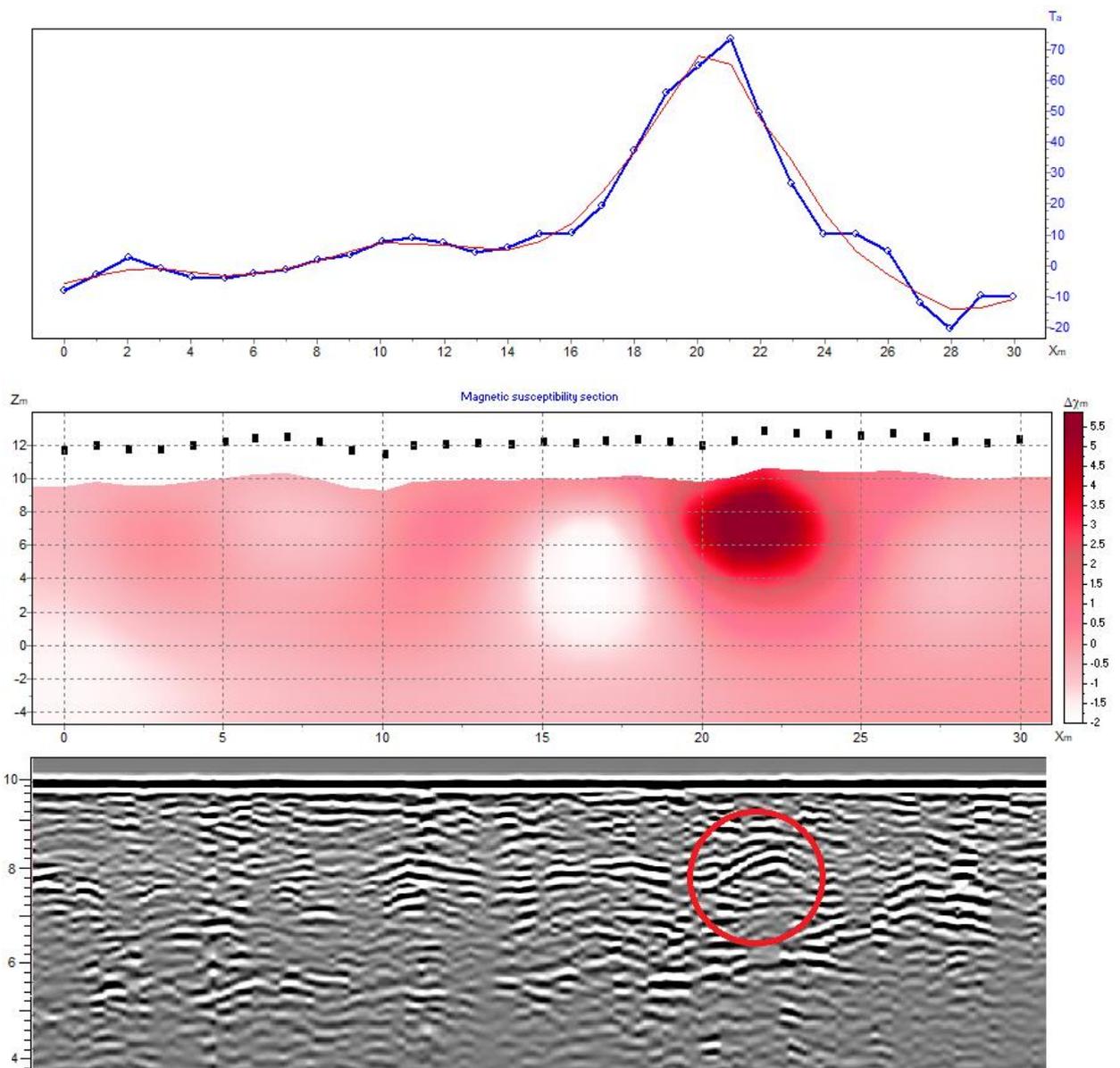


Рисунок 37. Объект №4: график аномального магнитного поля (синим – измеренное магнитное поле, красным – рассчитанное магнитное поле от модели) (сверху); модель, полученная в результате инверсии (посередине); георадарный разрез с выделенным дифрагирующим объектом (снизу)

### Объект №5

Данная зона располагается в 400 м от начала профиля «PR-2». Аномалия имеет амплитуду 35 нТл. Была рассчитана глубина залегания верхней кромки объекта, аппроксимируемого шаром, которая составила 2 м. По полученной в результате инверсии модели видно, что центр объекта расположен на 3 м ниже поверхности. При оценке радарограммы в данном месте наблюдается характерная зона высокоамплитудных отражений (рис. 38).

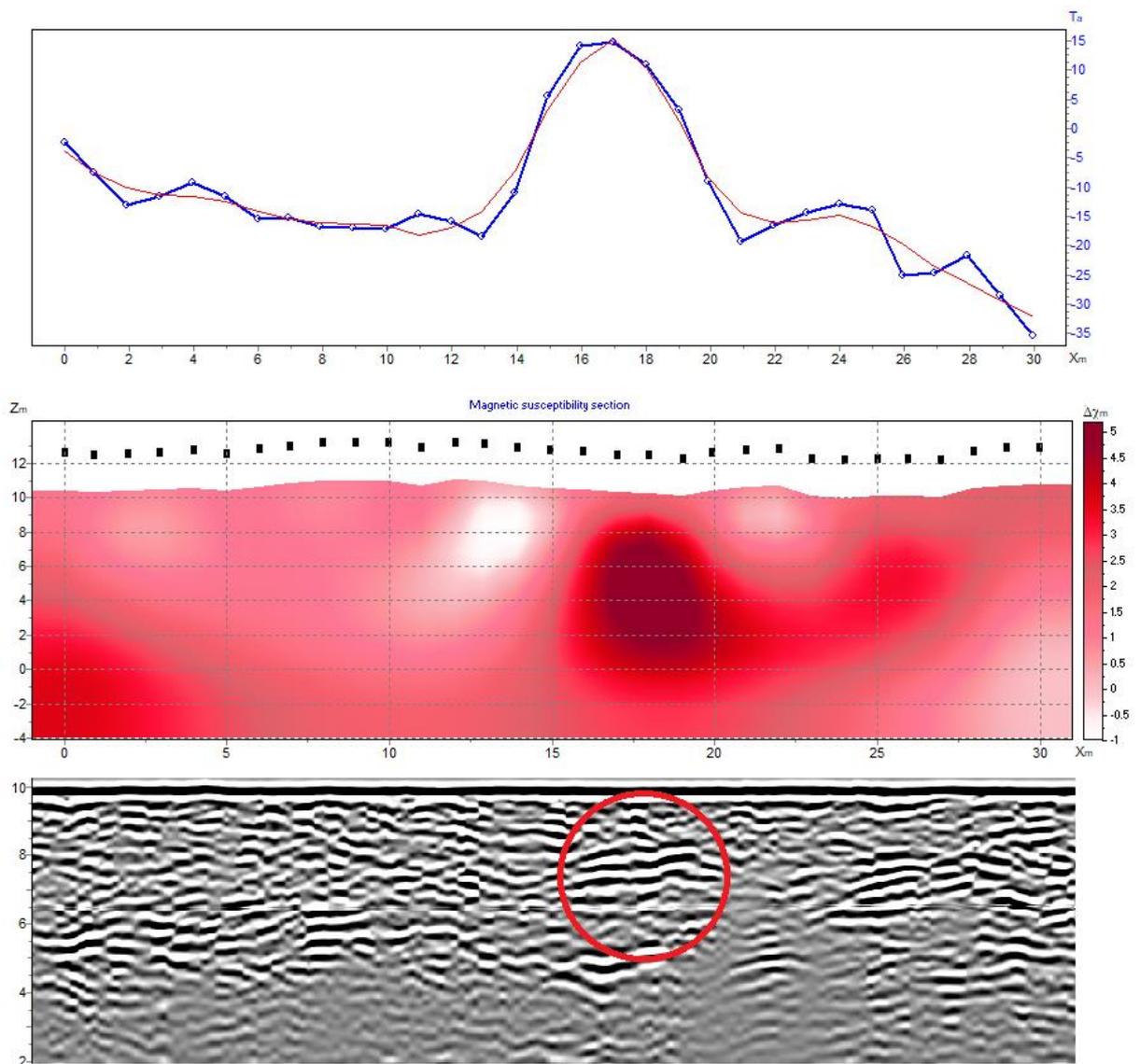


Рисунок 38. Объект №5: график аномального магнитного поля (синим – измеренное магнитное поле, красным – рассчитанное магнитное поле от модели) (сверху); модель, полученная в результате инверсии (посередине); георадарный разрез (снизу)

### 4.3. Объект на акватории Невы

Как уже упоминалось ранее, была проведена аэромагнитная съемка над прилегающей к Невскому пятачку акваторией Невы, в результате чего была получена карта аномального магнитного поля (рис. 22). На данной карте, в юго-западной ее части, выделяется аномалия, имеющая амплитуду 200 нТл, которая, предположительно может соответствовать крупному объекту на дне Невы. Данным объектом может быть затопленная при переправе военная техника, однако не исключено, что это может быть современной плавсредство, часть трубопровода или иной объект. По карте лоции данного участка Невы видно, что в месте залегания объекта глубина составляет около 10-14 м (рис. 39).

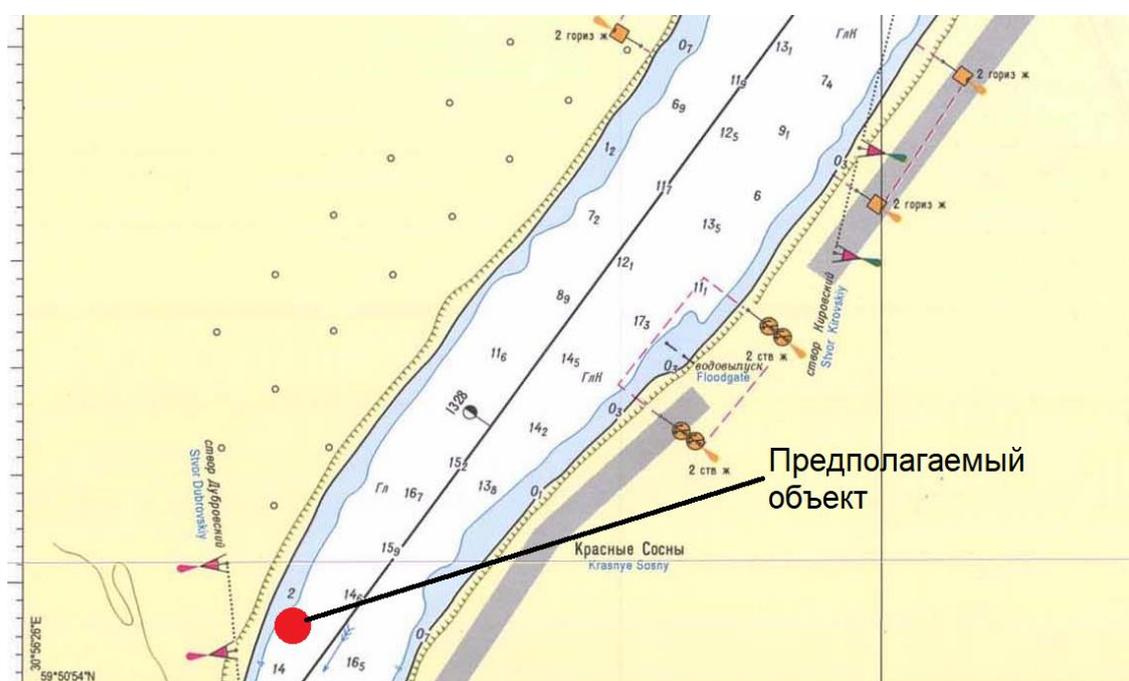


Рисунок 39. Карта лоции акватории Невы, прилегающей к Невскому пятачку

Таким образом, была рассчитана модель, учитывающая высоту съемки 10 м над водой и глубину воды, которая составляет 10 м в данном месте (рис. 40). Оценив данные и полученную модель, можно судить о том, что центр данного объекта расположен на глубине 10м ниже уровня воды и обладает крайне большой намагниченностью. Таким образом, аномалообразующий объект лежит на поверхности дна или на небольшом заглублении, что хорошо коррелирует с предположениями о затопленной военной технике или лодке.

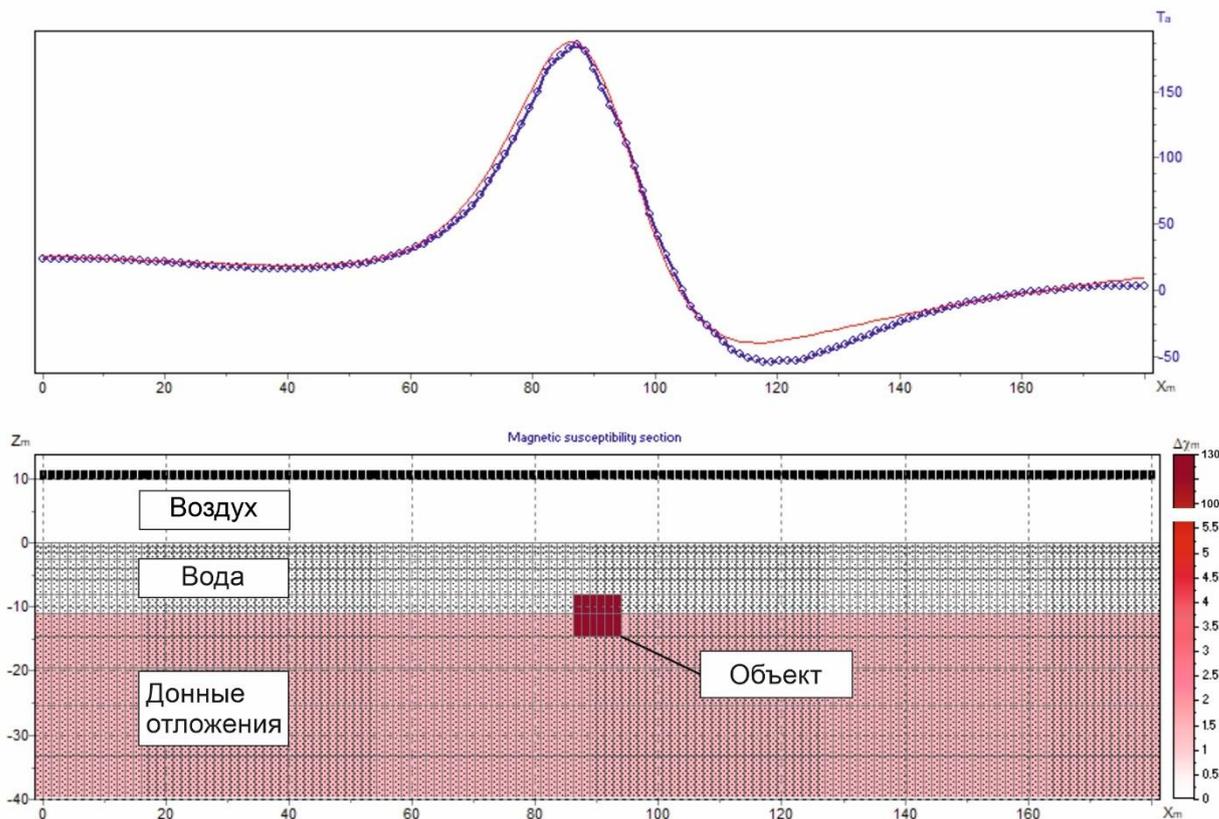


Рисунок 40. График аномального магнитного поля (сверху) и рассчитанная в результате инверсии модель (снизу)

Однако по графикам аномального магнитного поля, указанным на рисунке 40 так же видно, что отрицательная часть аномалии подбирается моделью не точно. Это связано с тем, что данный аномалообразующий объект не является точечным, а следовательно, для более достоверной интерпретации следует провести расчёты влияния эффекта размагничивания. Аналитические расчёты возможны только для эллипсоида и его частных случаев. Полупространство, шар, круговой цилиндр (и, в более общем случае, эллипсоиды) в однородном поле намагничиваются однородно. Если намагничивающее поле направлено вдоль какой-либо из осей эллипсоида, его намагниченность может быть определена по формуле:

$$I = \frac{\kappa H + I_n}{1 + N\kappa} \text{ [Блох, 2012]},$$

то есть влияние размагничивания может быть учтено введением безразмерного коэффициента размагничивания  $N$ , зависящего от формы эллипсоида.  $0 \leq N \leq 1$ . Сумма коэффициентов размагничивания вдоль всех полуосей  $N_a + N_b + N_c = 1$  [Блох, 2012].

По И.И. Киферу (1969): «При намагничивании во внешнем поле образца или детали из ферромагнитного материала разомкнутой формы (например, цилиндра) на его краях образуются магнитные полюсы, создающие внутри образца магнитное поле обратного по отношению к внешнему полю направления. Размагничивающее поле полюсов образца  $H_0$  пропорционально его намагниченности  $J$  и равно:  $H_0 = NJ$ .»

Коэффициент  $N$ , связывающий напряжённость собственного поля образца и его намагниченность, коэффициентом размагничивания. Если образец находится во внешнем магнитном поле напряжённостью  $H_b$ , то истинная напряжённость поля в образце равна  $H_{in} = H_b - NJ$  [Кифер, 1969].

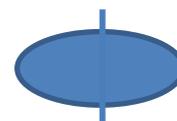
Коэффициент размагничивания может быть точно рассчитан только для эллипсоидов вращения, которые имеют однородную намагниченность (в частности, для шара  $N = 1/3$ , для очень тонкой пластинки  $N = 1$ , для бесконечно длинного цилиндра в поперечном поле  $N = 1/2$ ). Для некоторых образцов простой формы коэффициент размагничивания рассчитывается по эмпирическим формулам, в большинстве случаев коэффициент размагничивания определяется экспериментально [Кифер, 1969].

Размагничивающий фактор  $N$  для эллипсоидов вращения (большая полуось -  $a$ ) при намагничивании вдоль оси вращения [Чечерников, 1969]:

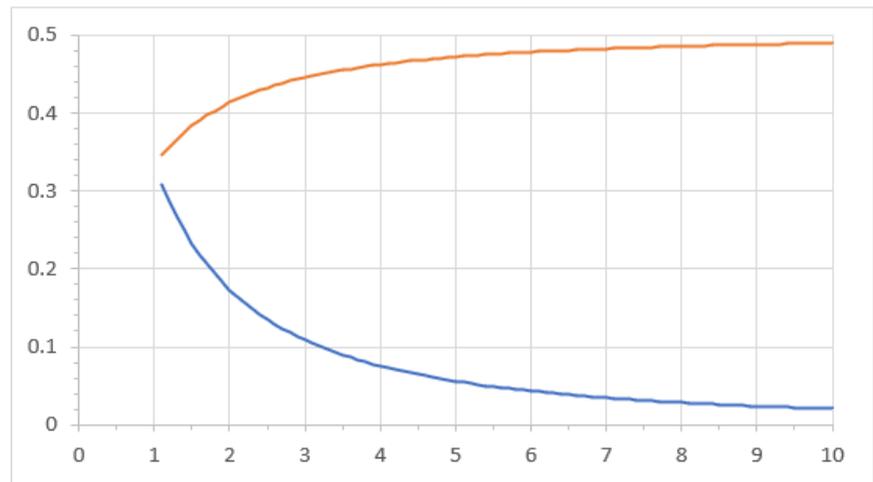
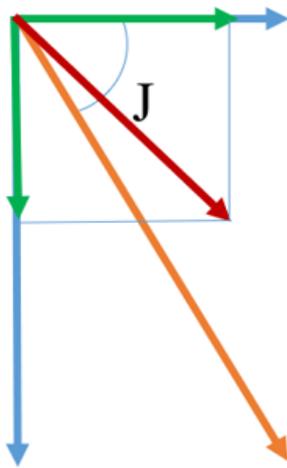
Для овоида:  $\gamma = \frac{a}{b} > 1$ , 
$$N_a = \frac{1}{\gamma^2 - 1} \left[ \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} \ln(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}) - 1 \right]$$



Для сфероида:  $\delta = \frac{b}{a} < 1$ , 
$$N_b = \frac{1}{1 - \delta^2} \left[ 1 - \frac{\delta}{\sqrt{1 - \delta^2}} \arccos \delta \right]$$



Эффект размагничивания может интерпретироваться как уменьшение наклонения. Это явление связано с разной степенью уменьшения составляющих вектора намагниченности по осям эллипсоида (рис. 41)



*Рисунок 41. Слева - изменение составляющих вектора намагничивания в результате эффекта размагничивания; справа – зависимость коэффициента размагничивания  $N$  для овиода при намагничении вдоль оси  $a$  (синий) и вдоль оси  $b$  (оранжевый) от отношения полуосей  $a/b$*

В результате моделирования было выявлено, что эффективная магнитная восприимчивость данного аномалообразующего объекта не превышает 1 ед. СИ (рис. 42). При проведении расчётов было получено, что эффект размагничивания в случае исследуемого аномалообразующего объекта изменяет магнитное наклонение с  $73^\circ$  до  $70^\circ$ , что не является критичным. Наилучшая сходимость параметров наблюдалась при выборе отношения осей эллипсоида  $a/b$  равным 1,5. Данное соотношение коррелируется с предположением о том, что аномалообразующим объектом может являться танк. Для подтверждения этого предположения необходимо проведение гидролокации бокового обзора (ГЛБО).

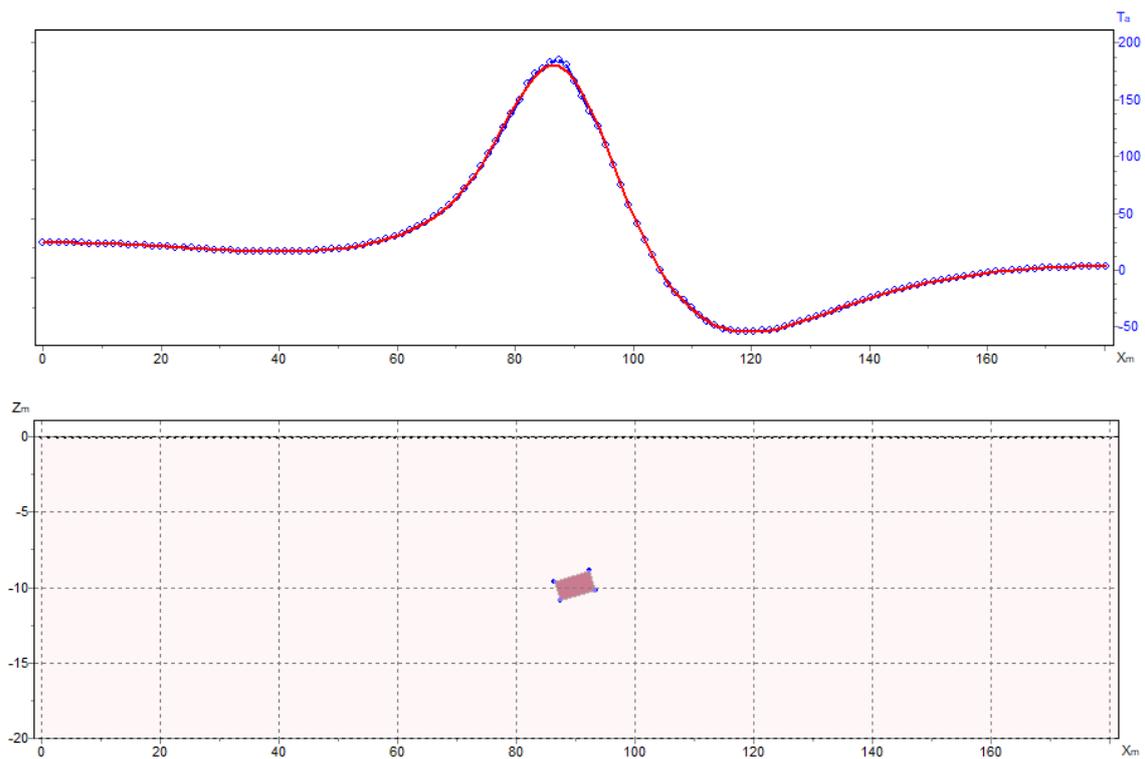


Рисунок 42. Расчёт поля от полигональной модели аномалообразующего объекта (для  $\chi=1000$  ед. СГС\* $10^{-5}$ )

## Заключение

По итогу анализа полученных материалов можно утверждать, что метод георадиолокации хорошо проявил себя в определении геологического строения территории. Было выделено 2 отражающих горизонта, которые прослеживаются практически на всю длину профилей. Опираясь на априорные геологические данные об особенностях залегания и составе слоёв верхней части разреза, а также на данные сейсморазведки МПВ был восстановлен нормальный геологический разрез территории Невского пятачка.

По данным магниторазведки было выявлено 5 достаточно крупных аномалообразующих объектов на территории Невского пятачка, а также 1 объект на дне реки Невы. Четыре из пяти данных объектов были подтверждены по данным георадиолокации. В результате моделирования и проведения расчётов были выявлены параметры залегания объекта на дне Невы.

По итогу поисков с металлоискателем было выявлено 243 приповерхностного объекта. При наложении точек металлодетектирования на карту аномального магнитного поля не было выявлено прямой корреляции аномалий со сгущениями полученных точек, что, вероятно, связано с слишком малым размером этих объектов и говорит о большой чувствительности используемого металлоискателя, но малой глубинности - около 20 см.

Таким образом, можно с уверенностью сказать об успешном применении комплекса геофизических методов для проведения инженерно-геофизических и военно-археологических работ, предшествующих строительству. Были построены карты, схемы и графики, отражающие расположение и параметры данных объектов. Полученные материалы будут переданы администрации музея «Прорыв Блокады Ленинграда» для дальнейшего квалифицированного извлечения данных объектов и проведения строительных работ.

## Список использованной литературы

1. Bianco C. и др. The messapic site of Muro Leccese: New results from integrated geophysical and archaeological surveys // *Remote Sens.* 2019. Т. 11. № 12.
2. Connor M., Scott D.D., Douglas D.D. Metal detector use in archaeology: An introduction // *Hist. Archaeol.* 1998 324. 2016. Т. 32. № 4. С. 76–85.
3. Conyers L. Ground-penetrating radar for archaeology // 2013.
4. Conyers L. Interpreting ground-penetrating radar for archaeology // *Interpret. Ground-penetrating Radar Archaeol.* 2016. С. 1–220.
5. Conyers L., Goodman D. Ground-penetrating radar: an introduction for archaeologists // AltaMira Press. 1997.
6. Deiana R., Leucci G., Martorana R. New Perspectives on Geophysics for Archaeology: A Special Issue // *Surv. Geophys.* 2018. Т. 39. № 6. С. 1035–1038.
7. Everett M.E. и др. Geophysical investigation of the June 6, 1944 D-Day invasion site at Pointe du Hoc, Normandy, France // *Near Surf. Geophys.* 2006. Т. 4. № 5. С. 289–304.
8. Gaffney C. и др. D-Day: geophysical investigation of a World War II German site in Normandy, France // *Archaeol. Prospect.* 2004. Т. 11. № 2. С. 121–128.
9. Giannopoulos A. Modelling ground penetrating radar by GprMax // *Constr. Build. Mater.* 2005. Т. 19. № 10. С. 755–762.
10. Goodman D., Piro S. GPR remote sensing in archaeology // 2013.
11. Heimmer D.H. Near-Surface High Resolution Geophysical Methods for Cultural Resource // 1992.
12. Herbich T. Magnetic prospecting in archaeological research: a historical outline // *Arceological Pol.* 2015. Т. 53. С. 21–68.
13. Łyskowski M. и др. Historical anthropogenic layers identification by geophysical and geochemical methods in the Old Town area of Krakow (Poland) // *Catena.* 2018. Т. 163. С. 196–203.
14. Malfitana D. и др. The potential of integrated GPR survey and aerial photographic analysis of historic urban areas: A case study and digital reconstruction of a Late Roman villa in Durrës (Albania) // *J. Archaeol. Sci. Reports.* 2015. Т. 4. С. 276–284.
15. Monterroso-Checa A. и др. Use of remote sensing, geophysical techniques and archaeological excavations to define the Roman amphitheater of torreparedones (Córdoba, Spain) // *Remote Sens.* 2019. Т. 11. № 24.
16. Mozzi P. и др. The Roman City of Altinum, Venice Lagoon, from Remote Sensing and Geophysical Propection // *Archaeol. Prospect.* 2016. Т. 23. № 1. С. 27–44.
17. Novo A. и др. Multichannel 3D GPR array systems: Recent results in engineering and archaeology // *library.seg.org.* 2013. С. 433–441.
18. Parrington M., Schenck H., Thibaut J. The Material World of the Revolutionary War Soldier at Valley Forge // 1984. С. 125–162.

19. Pérez Gracia V. и др. GPR survey to confirm the location of ancient structures under the Valencian Cathedral (Spain) // *Journal of Applied Geophysics*. : Elsevier Science Publishers B.V., 2000. С. 167–174.
20. Rees-Hughes L. и др. Multi-disciplinary investigations at PoW Camp 198, Bridgend, S. Wales: site of a mass escape in March 1945 // *J. Confl. Archaeol*. 2016. Т. 11. № 2–3. С. 166–191.
21. Scott D.D. и др. *Archaeological Perspectives on the Battle of the Little Bighorn* // 1989.
22. Scott D.D., Fox R.A. *Archaeological Insights into the Custer Battle* // 1987.
23. Trinks I. и др. Mapping the urban subsoil using ground penetrating radar – challenges and potentials for archaeological prospection // *ArchéoSciences*. 2009. № 33 (suppl.). С. 237–240.
24. Trinks I., Neubauer W., Hinterleitner A. First High-resolution GPR and Magnetic Archaeological Prospection at the Viking Age Settlement of Birka in Sweden // *Archaeol. Prospect*. 2014. Т. 21. № 3. С. 185–199.
25. Urban T.M. и др. Ground-penetrating radar survey on the island of Pantelleria (Italy) reveals an ancient architectural complex with likely Punic and Roman components // *J. Appl. Geophys*. 2015. Т. 123. С. 164–169.
26. Vickers R., Dolphin L., Johnson D. *Reports of the Chaco Center. Volume 1. National Park Service and University of New Mexico // Archeol. Investig. Chaco Canyon using a Subsurf. radar. Albuquerque, NM, USA. 1976. С. 81–101.*
27. Аплонов С.В., Титов К.В. *Геофизика для геологов*. Санкт-Петербург: СПбГУ, 2010.
28. Блох Ю.И. *Теоретические основы комплексной магниторазведки*. Москва: , 2012. 160 с.
29. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. *Сейсморазведка*. Тверь: Издательство АИС, 2006.
30. Борисик А.Л., Пятигорский Е.В. Реконструкция линии немецкой береговой обороны 1942-1944 гг. и поиск объектов военно-исторического наследия о. Большой Тютерс по данным геофизических методов и натуральных раскопок // *Историческая Информатика*. 2021. № 3. С. 144–161.
31. Владов М.Л., Старовойтов А.В. *Введение в георадиолокацию. Учебное пособие*. : Изд-во МГУ, 2004. 153 с.
32. Восс О., Мельников А.В., Смекалова Т.Н. *Магниторазведка в археологии. 12 лет применения Оверхаузеровского градиентометра GSM-19WG / под ред. Б.В. Беван*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет, 2007.
33. Журбин И.В. *Геофизика в археологии: методы, технология и результаты применения*. Монография. / под ред. М.Г. Иванова. Ижевск: Удмуртский институт истории, языка и литературы УрО РАН, 2004.
34. Кифер И.И. *Испытания ферромагнитных материалов*. Москва: Энергия, 1969. Вып. 3-е изд.
35. Лебедев Ю.М. *Невский пяточок — взгляд с обеих сторон* // 2005.
36. Логачев А.А. *Магниторазведка*. Ленинград: Недра, 1968.

37. Мощанский И. Прорыв блокады Ленинграда. Эпизоды великой осады // 2010.
38. Никитин А.А., Хмелевской В.К. Комплексирование геофизических методов. Тверь: Издательство ГЕРС, 2004.
39. Новиков К.В. Магниторазведка. Учебное пособие. Часть 1. Москва: , 2013.
40. Палагин В.В., Попов А.Я., Дик П.И. Сейсморазведка малых глубин. Москва: Недра, 1989.
41. Степанов А.В., Головцов А.В. Перспективы применения малоглубинной сейсморазведки при археологических исследованиях на территории Болгарского городища // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. Том 155. 2013. С. 123–134.
42. Чечерников В.И. Магнитные измерения / под ред. Е.И. Кондорский. Москва: Изд-во МГУ, 1969. Вып. 2-е изд. 385 с.
43. Шигин Г.А. Битва за Ленинград: крупные операции, «белые пятна». Санкт-Петербург: Полигон, 2004.
44. Wikipedia [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Невский\\_пятачок](https://ru.wikipedia.org/wiki/Невский_пятачок).