

Виктор Харебов

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В АРХЕОЛОГИИ

*Методы прикладной геофизики
в археологических исследованиях*



ВИКТОР ХАРЕБОВ

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В АРХЕОЛОГИИ

Методы прикладной геофизики
в археологических исследованиях

Издательские решения
По лицензии Ridero
2024

УДК 55
ББК 26.3
Х20

Шрифты предоставлены компанией «ПараТайп»

Харевов Виктор

Х20 Геофизические методы в археологии : Методы прикладной геофизики в археологических исследованиях / Виктор Харевов. — [б. м.] : Издательские решения, 2024. — 58 с. ISBN 978-5-0062-9612-1

Книга содержит краткое описание современных методов прикладной геофизики применительно к задачам археологии. Описаны процедуры проведения отдельных измерений и геофизических съемок на предмет обнаружения археологических объектов и картирования исследуемого участка. Приведены результаты микросъемки в тестовом режиме для обнаружения магнитных аномалий в слое грунта. Прилагаются схема макета магнитометра, программный код (Python-скрипты) а также инструкции по установке среды разработки (IDE).

**УДК 55
ББК 26.3**

12+ В соответствии с ФЗ от 29.12.2010 №436-ФЗ

ISBN 978-5-0062-9612-1

© Виктор Харевов, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач современной археологии является поиск и раскопки археологических памятников, являющихся основой для исторических реконструкций и изучения культуры прошлых эпох. К археологическим памятникам относятся остатки архитектурных сооружений, фундаменты и кладки стен, курганы, могильники, включающие отдельные археологические объекты – керамику, предметы быта и другие находки, находящиеся в грунте или различных отложениях, называемых культурным слоем.

Сегодня методы исследований в археологии становятся все более совершенными, благодаря применению методов и технических решений естественных наук, прежде всего – наук о Земле. К ним относятся методы прикладной геофизики: магниторазведка, электроразведка, сейсморазведка. Особое значение имеют методы построения физико-археологических моделей и современная геофизическая аппаратура для измерений и обработки данных.

Геофизика в археологии (или археогеофизика) – новое направление в изучении археологических памятников до начала раскопок. При помощи разных методов прикладной геофизики можно обнаружить скрытые под зем-

лей объекты и дать археологам ценные сведения об их свойствах, форме, размерах и глубине залегания. Кроме того, геофизический анализ и картирование планируемой зоны раскопок позволяет существенно снизить сроки и финансовые затраты на проведение археологических исследований.

Другой, не менее важной задачей является датировка найденных археологических находок. Определение абсолютного возраста производится с помощью различных физических методов (радиоуглеродный, археомагнитный, термолюминесцентный и др.).

Основной задачей археогеофизики является обнаружение и выделение отдельных археологических объектов (аномалий) с последующим изучением их состава, формы и влияния вмещающей среды. При исследовании используется отличие физических свойств аномалий от свойств вмещающей среды, например, разница в плотности, различные электрические и магнитные характеристики, упругие свойства, и др., неодинаково реагирующих на естественные и искусственно создаваемые внешние воздействия. Зная параметры аномалии можно рассчитать физическое поле, создаваемое этой аномалией, то есть решить прямую задачу археогеофизики.

Методы прикладной геофизики при археологических исследованиях решают обратную задачу археогеофизики – по данным измерения аномального поля, создаваемого археологическим объектом определяются его размеры, форма, глубина залегания и другие физические характеристики (металл, диэлектрик, кожа, каменная кладка, древесина).

В первой главе книги дано краткое описание современных методов прикладной геофизики применительно

к задачам археологии. Описаны процедуры проведения отдельных измерений и геофизических съемок на предмет обнаружения археологических объектов и картирования исследуемого участка.

Во второй главе приведены характеристики лучших профессиональных образцов геофизической аппаратуры на современном рынке. Дано описание действующего макета магнитометра и технические характеристики его отдельных модулей и блоков. Макет создан автором в демонстрационных целях.

В третьей главе приведены результаты микромагнитной съемки в тестовом режиме с использованием макета магнитометра.

В Приложении приведены принципиальная электрическая схема макета магнитометра, общий вид отдельных модулей макета, программный код (microPython) а также инструкция по установке среды разработки (IDE).



ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наиболее перспективными методами прикладной геофизики для археологических исследований являются магниторазведка, электроразведка и сейсморазведка.

Магниторазведка основана на изучении естественного геомагнитного поля и его аномалий. По выявленным магнитным аномалиям можно обнаружить слабо намагниченные археологические объекты, определить их форму, размеры и глубину залегания в культурном слое.

Считается, что метод высокоточных магнитных измерений является одним из самых эффективных методов прикладной геофизики, применяемых в археологии.

Электроразведка, как правило, используется в комплексе с магнитными измерениями. К числу наиболее популярных методов относятся следующие методы малоуглубинной электроразведки:

- Электропрофилирование (ЭП);
- Вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ);
- Электротомография (ЭТ).

При электропрофилировании с помощью постоянного или низкочастотного питающего поля определяются структура и удельное электрическое сопротивление культурного слоя в горизонтальном направлении, а при электротомографии – по вертикали (в глубину). По картам аномалий удельного электрического сопротивления грунта выявляют археологические объекты, находящиеся в поверхностном слое и производят их пространственную реконструкцию. Относительная простота этих методов и возможность проведения с их помощью детальных профильных и площадных съемок позволяет археологам заменить трудоемкие сплошные раскопки выборочными.

Электротомография представляет собой комбинацию электрического зондирования и профилирования. Особенностью метода электротомографии является многократное включение одних и тех же электродов на профиле наблюдений в питающие и измерительные цепи. При интерпретации полученных таким способом данных получают детальные двухмерные и трехмерные модели георазреза, которые значительно отличаются по информативности от стандартных горизонтально-слоистых моделей.

Сейсмические методы в археологии менее популярны, из-за существенного превышения затрат на них применение, по сравнению с методами электро- и магниторазведки. Методы сейсморазведки наиболее эффективны при изучении древних строительных сооружений, пустот, различных укреплений относительно большой протяженности. Современные сейсморазведочные технологии позволяют получать качественные двух- и трехмерные изображения подобных археологических объектов с большой точностью.

Для обнаружения отдельных археологических объектов из обожженной глины или металлов наиболее применимы электро- и магниторазведочные методы исследований.

Из индуктивных методов прикладной геофизики применяемых в археологии наиболее популярен метод незаземленной петли. Источником переменного поля служит прямоугольная петля больших размеров, внутри которой производятся измерения магнитных компонент, обычно вертикальной компоненты поля. Измерения проводятся в ближней (или индукционной) зоне источника поля, где расстояния между источником поля и точками его наблюдения меньше длины волны источника поля.

Метод незаземленной петли применяется для обнаружения археологических объектов обладающих низким удельным сопротивлением либо высокой магнитной проницаемостью.

Тепловая съемка местности проводится с целью обнаружения археологических объектов, обладающих аномальными тепловыми свойствами по отношению к тепловым свойствам поверхностного слоя грунта. Данные о температурном поле исследуемого участка грунта может быть получены путем обзора его поверхности приемником теплового излучения. По зарегистрированному тепловому излучению определяется так называемая радиационная температура, которая обычно ниже физической, поскольку она зависит еще и от излучательной способности поверхности грунта.

Специальная аппаратура преобразует тепловые контрасты в тоновые и регистрирует их в виде массива данных измерений или термографического изображения.

Перспектива использования тепловой съемки при археологических исследованиях эффективна на местности, где различие между дневными и ночными температурами достаточно большое, чтобы тепловые следы археологических объектов или других конструкций проявлялись на тепловых изображениях.

В основе метода георадиолокации, применяемого в последнее время для построения детальных георазрезов и картирования археологических объектов лежит кинематическая аналогия процессов волнового распространения электромагнитных волн в среде с процессами распространения сейсмических волн в малоглубинной сейсморазведке. Приборы с помощью которых производится радиолокационное зондирование называются георадары или GPR (Ground Penetrating Radar).

Результаты радиолокационного зондирования с помощью георадаров имеют большое внешнее сходство с данными, получаемыми при сейсмической разведке по методу отраженных волн. По линиям георадарных наблюдений получают электромагнитные разрезы, внешне напоминающие сейсмические, однако, георадарные модели основаны не на разности упругих свойств среды (как в сейсморазведке), а на разности диэлектрических свойств исследуемых объектов и поверхностного слоя грунта.

МИКРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА

Основной задачей микромагнитной съемки при археологических исследованиях является изучение строения поверхностного слоя грунта и обнаружение находящихся в нем археологических объектов по различию их магнитных свойств с магнитными свойствами грунта.

Аномальный эффект от почвенных неоднородностей может достигать 20 нТл, объекты из обожженной глины

(керамика, древние очаги, печи) могут формировать аномалии до 1000 нТл, а железные предметы и шлаки — до 2000 нТл.

Различают два вида магнитных съемок: маршрутные (профильные) и площадные, при которых выявляются участки с аномальными значениями магнитного поля и его градиентов.

Точки наблюдения обычно располагаются по системе параллельных профилей, ориентированных перпендикулярно предполагаемому простиранию изучаемых археологических объектов и имеют протяженность, в 5–10 раз превышающую их поперечные размеры.

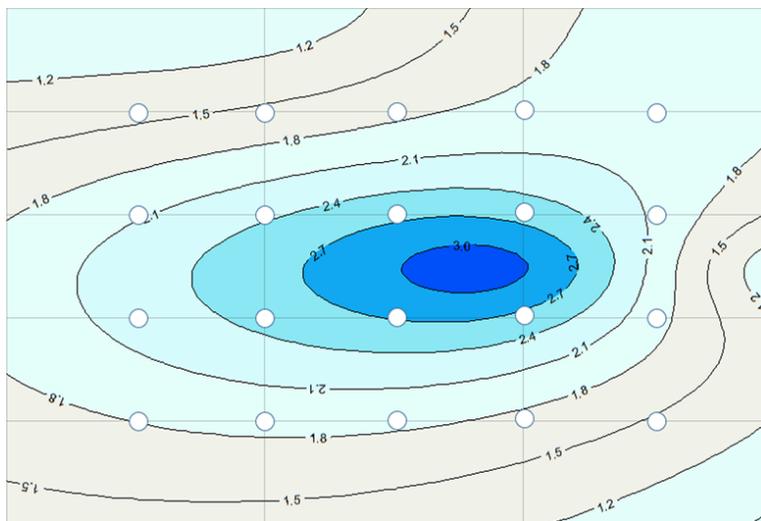


Рис. 1 – Сетка профилей и размер шага по профилю в зависимости от величины аномалии археологического объекта.

Расстояния между профилями должны быть по крайней мере в три раза меньше продольных размеров исследуемых объектов для того, чтобы аномалия фиксировалась на трех и более соседних профилях.

Шаг по профилю определяется исходя из поперечных размеров археологических объектов, и он также должен быть по крайней мере в три раза меньше их поперечных размеров. Это необходимо для получения четкого аномального эффекта не менее чем на трех-пяти точках каждого профиля.

Возможные соотношения расстояний между профилями и точками наблюдений по профилю приведены в Таблице:

Масштаб съемки	Расстояние между профилями, м	Шаг съемки при высокоточных наблюдениях, м
1:2000	20.0	2.0 - 4.0
1:1000	10.0	1.0 - 2.0
1:500	5.0	0.5 - 1.0
1:200	2.0	0.2 - 0.5
1:100	1.0	0.1 - 0.25

Подготовительный этап включает в себя следующие шаги:

1. По параметрам выбранной археогеофизической модели исследуемого объекта рассчитывается ожидаемая аномалия и строится ее график.

2. По амплитуде рассчитанного значения аномалии создаваемой археологическим объектом определяется точ-

ность съемки. В большинстве случаев при аномалиях меньше 100 нТл погрешность должна составлять 2–3 нТл.

3. После обоснования оптимальной точности съемки определяются густота и форма сети наблюдений (расстояние между профилями и шаг наблюдений по профилю).

4. Расстояние между профилями выбирают таким образом, чтобы они прослеживались не менее чем на трех соседних профилях. Выбранное расстояние будет определять масштаб съемки.

5. Шаг съемки зависит от ширины аномалии и проектной точности съемки. Профили ориентируются вкрест ожидаемого простираения изучаемого археологического объекта.

6. Маршрут должен начинаться и заканчиваться на опорном (контрольном) пункте. По наблюдениям на опорном пункте устанавливают нуль-пункт прибора – отсчёт, соответствующий полю, принятому за нормальное (определяется по картам нормального поля).

Рекомендуемый масштаб микромагнитных съемок для обнаружения слабомагнитных археологических объектов составляет 1:10–1:50 с постоянным уточнением положения сети профилей в зависимости от простираения археологического объекта.

При микромагнитной съемке производится исследование небольших участков грунта с равномерной и густой сетью точек наблюдения (5 × 5 м, 3 × 3 м, 1 × 1 м). Для измерений модуля напряженности магнитного поля T и градиентов ΔT , ΔZ применяются высокоточные полевые магнитометры и градиентометры (протонные или квантовые).



Рис. 2 – Квантовый магнитометр (модель Geometrics G-858) для наземной магнитной съемки в долине Сюрприз, Калифорния. Author: Jonathan Glen, USGS, CCO License, Public Domain.

Чтобы исключить влияние геомагнитных вариаций измерения на рядовых точках профилей (пикетах) производятся одновременно с измерениями на одном и том же опорном (или контрольном) пункте. По результатам измерений на контрольном пункте в наблюдаемые значения на профилях вносят поправки за геомагнитные вариации, через несколько замеров на рядовых точках.

Для оценки точности съемки на ряде точек (5 – 10% от общего количества) ведутся повторные наблюдения

и рассчитывается средняя квадратическая погрешность измерений. Требования к точности наблюдений при наземной съемке устанавливаются в зависимости от масштаба съемок и напряженности магнитного поля. В слабых полях точность наблюдений должна быть высокой: среднеквадратическая погрешность съемки не больше 5 нТл при мелкомасштабных съемках и не больше 2 нТл при крупномасштабных.

В результате полевой съемки по наблюдаемым составляющим T , ΔT , ΔZ рассчитываются аномальные магнитные поля:

$$T_a = T - T_n - T_{var},$$

$$\Delta T_a = \Delta T - \Delta T_{var},$$

$$\Delta Z_a = \Delta Z - \Delta Z_{var},$$

где T_n – нормальное поле, T_{var} , ΔT_{var} , ΔZ_{var} – вариации поля, измеренные на контрольном пункте и соответствующие измерениям на рядовых точках профилей.

При построении карт профилей на карте наносятся профили наблюдений, а перпендикулярно им откладываются аномалии. На картах у каждой точки записываются аномальные значения геомагнитного поля и проводятся линии равных значений (изолинии). Сечение изолиний при построении карт должно быть в 2 – 3 раза больше точности определения аномалий.

При обработке данных магнитных съемок определяются геометрические параметры (форма, размеры, глубина залегания) и магнитные свойства (остаточная намагниченность, магнитная восприимчивость) археологических объектов, и вместе с результатами магнитного картирования передаются археологам для планировки и проведения археологических раскопок.

В качестве примера на Рис. 3 приведена карта градиента аномального поля, построенная по результатам высокоточной микромагнитной съемки:

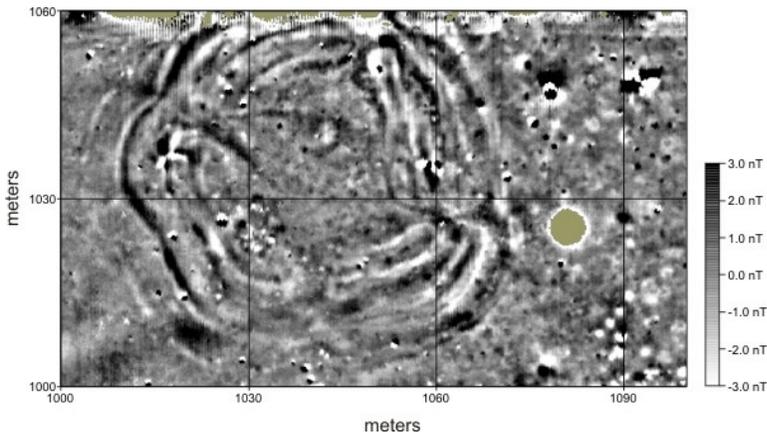


Рис. 3 – Микромагнитная съемка градиента аномального поля на месте археологических раскопок в районе Грейт-Бенд в центральном Канзасе. Author: Pöhönen, GNU Free Documentation License.

ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЕ

Метод электропрофилеирования реализуется в виде электроразведочной установки с питающими и приемными электродами, с помощью которых измеряется кажущееся удельное электрическое сопротивление грунта и его аномалии вдоль заданного направления (профиля).

Через питающую линию пропускается постоянный или низкочастотный переменный ток от аккумуляторных батарей или от генератора. Измеряется сила тока в питающей цепи. На приемных электродах измеряется разность потенциалов между ними. В качестве электродов используются металлические стержни, выполненные из стали (питающая линия) и латуни (приемная линия). Провода должны быть прочными на разрыв, иметь надежную изоляцию и достаточно низкое удельное электрическое сопротивление.

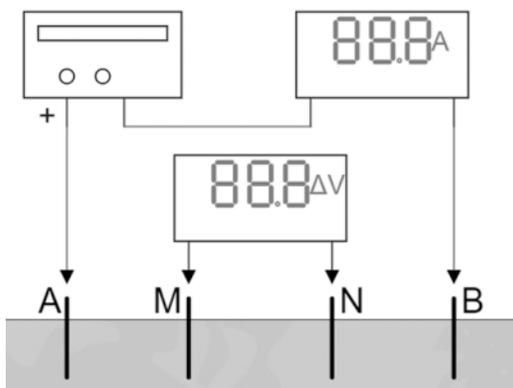


Рис. 4 – Схема электроразведочной установки с питающими и приемными электродами.

Наиболее распространенной электроразведочной установкой является четырехэлектродная симметричная установка АМNB. Питающие и приемные электроды этой установки располагаются на одной прямой линии профиля, причем приемные электроды М и N отстоят от центра отрезка АВ на одинаковых расстояниях, центры питающей и приемной линий находятся в одной точке.

Если расстояние между приемными электродами MN меньше одной трети расстояния между питающими электродами, то такая установка называется установкой Шлюмберже.

Установка Веннера имеет равные расстояния между приемными и питающими электродами ($AM=MN=NB$).

Кажущееся удельное сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\rho_k = k (\Delta U_{MN}) / (I_{AB}),$$

где:

I_{AB} — величина тока в амперах на отрезке AB;

ΔU_{MN} — разность потенциалов в вольтах на отрезке MN;

k — коэффициент установки:

$k = \pi (AM \cdot AN / MN)$ для установки Шлюмберже;

$k = 2\pi \cdot MN$ для установки Веннера;

AM, AN, MN — расстояние между электродами, м.

Для установки Веннера расчетная формула упрощается:

$$\rho_k = 2\pi s (\Delta U_{MN}) / (I_{AB}),$$

где:

$s = AB/2$ — величина полуразноса установки, м.

Удельное электрическое сопротивление слоев почвенного грунта зависит от многих факторов и может сильно различаться — от долей Ом·м до десятков тысяч Ом·м.

При погружении металлических электродов в почву, на границе контакта каждого электрода возникает двойной электрический слой. Это приводит к тому, что между электродами приемной линии возникает дополнительная разность потенциалов, которая называется ЭДС поляри-

зации. У латунных электродов приемной линии ЭДС собственной поляризации обычно составляет 20–30 милливольт, при температурной нестабильности 10%. У стальных электродов ЭДС поляризации в несколько раз выше, и обычно составляет 150–170 милливольт, при температурной нестабильности 20%.

ЭДС поляризации может вносить существенную ошибку при измерениях слабых сигналов, поэтому ее либо компенсируют, либо устраняют различными способами. При наиболее точных измерениях применяют специальные неполяризующиеся электроды.

При подключении к питающей линии генератора низкой частоты (порядка нескольких герц) проблема ЭДС поляризации сводится к минимуму.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ

Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) заключается в измерении кажущегося сопротивления установкой с возрастающим расстоянием между питающими электродами, при постоянном положении ее центра. При этом увеличивается глубина проникновения тока в слой грунта и на результаты измерений начинают оказывать влияние объекты, залегающие на бóльшей глубине.

Зондирование методом сопротивлений относится к геометрическому зондированию, при котором глубинность зондирования зависит от расстояния между питающими

и приемными электродами – чем больше расстояние, тем больше глубина зондирования. Чаще всего применяются четырехточечные (симметричные) зондирования, в которых изучают зависимость кажущегося сопротивления слоев грунта от полуразноса питающих электродов $AB/2$.

Археологические объекты, которые находятся в поверхностном слое грунта представляют собой неоднородности, нарушающие общую картину геоэлектрического разреза и являются объектами поиска.

Искажающее влияние объектов, находящихся в непосредственной близости от измерительных электродов, проявляется в виде вертикального сдвига кривой зондирования (или ее сегмента) по оси сопротивлений (Р-эффект). Кривая зондирования сдвигается вверх или вниз, причем значения увеличиваются или уменьшаются в зависимости от локального изменения плотности тока вблизи неоднородности.

Р-эффект возникает за счет изменения плотности тока над неоднородностью (вблизи приемных электродов) по сравнению с плотностью тока в горизонтальном поверхностном слое грунта. На геоэлектрическом разрезе Р-эффект проявляется как вертикальная аномалия.

С-эффект проявляется в виде заметного искажения кривой зондирования, когда питающий электрод А или В попадает на неоднородность, за счет резкого перераспределения плотности тока в геоэлектрическом разрезе. Обычно амплитуда С- эффекта меньше амплитуды Р- эффекта.

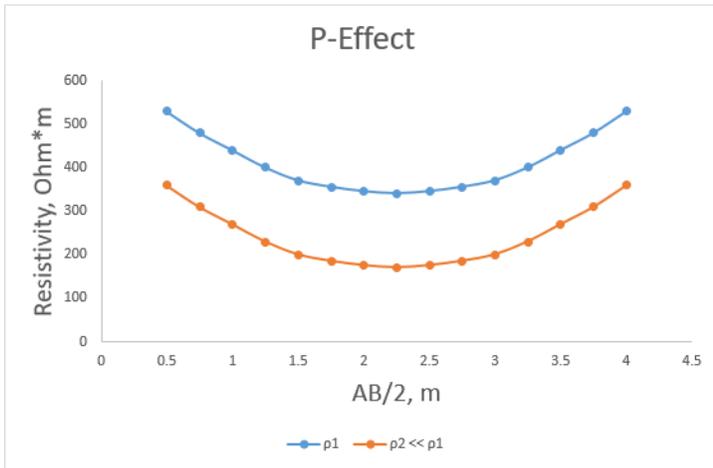


Рис. 5 – P-эффект – смещение кривой зондирования над неоднородностью.

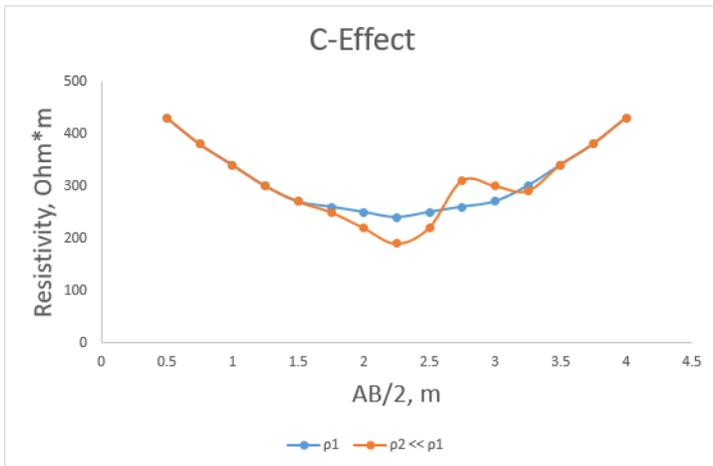


Рис. 6 – C-эффект – локальная аномалия при пересечении неоднородности питающим электродом.

ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ

Электротомография (Electrical Resistivity Tomography, Resistivity Imaging) – современное направление электро-разведки представляющее собой комбинацию вертикального электротомографирования и электропрофилирования.

Суть методики наблюдений заключается в многократных повторных измерениях удельного сопротивления грунта вдоль системы профилей при разных положениях источника питающих линий. Результаты измерений представляются двухмерными и трехмерными томограммами.

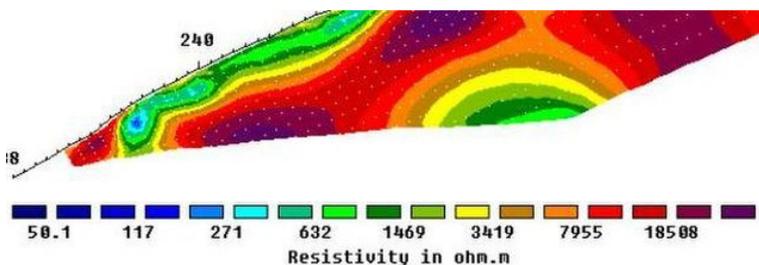


Рис. 7 – Двухмерная модель геоэлектрического разреза полученная с помощью электротомографической съемки. Author: Surányi Gergely, Creative Commons Zero, Public Domain.

Разрешающая способность метода электротомографии зависит от числа и плотности измерений, обычно число измерений превышает несколько тысяч на профиле.

Для достижения максимальной эффективности метода электротомографии применяется специальная многоэлек-

тродная аппаратура с программируемой автоматической коммутацией электродов. Каждый электрод может использоваться не только как измерительный, но и как питающий.

Однако, ввиду высокой стоимости многоэлектродной аппаратуры часто метод электротомографии реализуется в помощью стандартной одноканальной электроразведочной аппаратуры, совместно с блоком коммутации каналов. При этом коммутируются только приемные электроды, а питающие электроды переносятся вручную.

МЕТОД НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛИ

Метод незаземленной петли предназначен для прямого поиска проводящих археологических объектов, а также для детального исследования и классификации создаваемых ими аномалий по проводимости. Электромагнитное поле возбуждается переменным током, текущим в горизонтальной незаземленной прямоугольной петле. Приемным устройством является рамка с ферритовым сердечником, настроенная на рабочую частоту, с помощью которой производятся измерения.

В средней части петли, где первичное поле в достаточной степени однородно, создается сеть профилей с отдельными пикетами (или точками измерений) вкрест предполагаемого простираения аномалий от археологического объекта. Вдоль профилей на каждом пикете производятся измерения вертикальной магнитной компоненты поля или суммарного поля, которое является векторной суммой

первичного поля петли и вторичного поля аномального объекта.

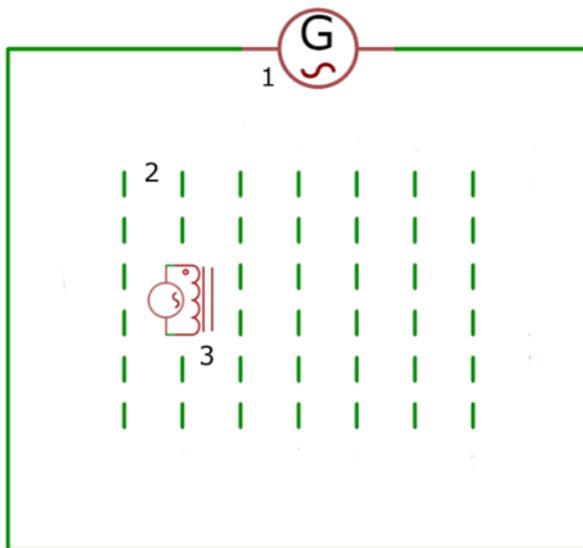


Рис. 8 – Площадная съемка методом незаземленной петли

(1 – генератор, 2 – линии профилей, 3 – сенсор)

В ряде случаев, вместо петли применяют бесконечно длинный кабель. При работе по методу длинного кабеля квазистационарное электромагнитное поле создается кабелем, расположенным на земле, оба конца которого заземлены и который питается от генератора токами низкой частоты – в диапазоне от от нескольких герц до нескольких килогерц.

При обработке результатов измерений выделяют два типа аномалий: от проводящих немагнитных объектов

и от объектов с повышенной магнитной восприимчивостью по отношению к почвенному грунту.

Над проводящим немагнитным объектом интенсивность аномалии увеличивается с ростом частоты питающего поля. Объясняется это тем, что электрический ток в контуре петли воздействует на проводящий немагнитный объект, в котором создается вторичное магнитное поле, направленное противоположно первичному полю петли. В результате возникает аномалия проводимости, поле которой меньше поля петли.

Над проводящими высокомагнитными объектами интенсивность аномалии уменьшается с ростом частоты, а при определенном значении частоты питающего поля знак аномалии изменяется на противоположный. Это происходит потому, что проводящий объект, имеющий большую магнитную восприимчивость по сравнению с вмещающим грунтом, под воздействием поля петли намагничивается, причем магнитное поле объекта направлено в ту же сторону, что и первичное поле петли. В результате суммарное (аномальное) магнитное поле будет больше, чем поле петли.

Таким образом, можно распознавать археологические объекты с магнитными свойствами (изделия из железа или керамика с магнитными включениями) от немагнитных объектов (золото, серебро), обладающих проводимостью.

На основе метода индукционного частотного зондирования разработаны так называемые глубинные детекторы, металлодетекторы или сканеры для бесконтактного исследования поверхностного слоя грунта.

Метод индукционного частотного зондирования намного быстрее, чем метод сопротивлений (электроразведка), гораздо информативнее и более помехоустойчив, чем электромагнитное картирование на одной частоте.

МЕТОД БИЭП

Метод бесконтактного измерения электрического поля (метод БИЭП) – относительно новый метод прикладной геофизики, разработанный специально для работ в особых условиях, где невозможно применение традиционных методов электроразведки. К таким условиям относятся техногенные участки – асфальтовые или бетонные покрытия, скальные породы, мерзлые грунты.

Основное отличие метода БИЭП от традиционных методов электроразведки заключается в том, что при бесконтактных измерениях поля используется емкостное заземление электродов вместо традиционного гальванического заземления.

В качестве примера реализации метода БИЭП можно привести аппаратуру Geometrics OhmMapper, представляющую собой измеритель удельного сопротивления почвы с емкостной связью.

Аппаратура OhmMapper работает на частоте приблизительно 16.6 кГц. Измерения производятся с помощью нескольких измерителей электрического поля емкостного типа и задающего генератора, последовательно подключаемых в косу, которую оператор перемещает по заданному профилю.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

В основе сейсмической съемки лежит изучение пространственно – временных характеристик поля упругих колебаний, создаваемых при помощи специального устройства – источника упругих колебаний. Распространяясь в толще грунта, упругие волны попадают на границы слоев грунта или поверхность отдельных объектов с различными упругими свойствами.

При этом они изменяют свое направление, углы лучей и амплитуду и частично возвращаются обратно на земную поверхность.

На пути следования волн размещаются пункты приема, где при помощи сейсмоприемников отраженные волны регистрируются и преобразуются в электрический сигнал.

Измеряя время распространения волн от источника до точки регистрации отраженных волн, их амплитуду, частоту и другие характеристики, можно получить информацию о структуре слоя грунта и неоднородности его упругих характеристик.

Электрические импульсы или сейсмотрассы потом объединяются в сейсмограммы и после предварительной обработки (усиления, фильтрации и преобразования в цифровую форму) поступают на сейсмическую станцию.

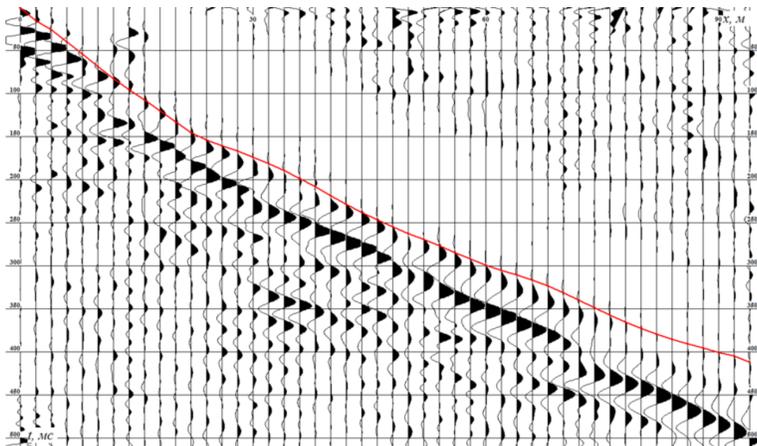
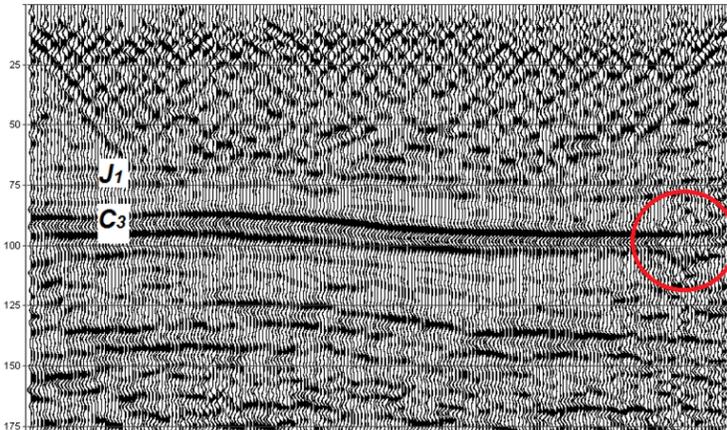


Рис.9 – Пример сейсмограммы (Выделен годограф первых вступлений). Author – VickRomanoff. Licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license.

На сейсмической станции первичный материал подвергается дальнейшей обработке и анализу, по результатам анализа создается временной или глубинный разрез, показывающий детальное картирование слоев грунта и наличие в нем аномальных археологических объектов.

Основные требования к сейсмическим станциям – высокая чувствительность к сейсмическим сигналам, стабильность технических характеристик, надежная защищенность от внешних воздействий и посторонних помех (густонаселенных районов, промышленных объектов, ж.-д. и автомобильных дорог).



*Рис.10 – Пример сейсмического глубинного разреза.
Author – VickRomanoff. Licensed under the Creative Commons
Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.*

По аналогии с электротомографией, сейсмическая томография подразумевает специальную методику измерений с использованием большого количества источников и приемников сейсмосигнала, при количестве сейсмотрасс достигающем десятков тысяч.

Сейсотомография использует времена пробега упругих волн от источника сигнала до пунктов его регистрации. Наибольшее применение в разведочной геофизике получила так называемая межскважинная сейсотомография.

ТЕРМОСЪЕМКА

Мини-термосъемка позволяет определить участки грунта с аномальной температурой участков исследуемой поверхности. Тепловые аномальные зоны могут создавать отдельные участки поверхностного слоя грунта или археологические объекты, обладающие различными тепловыми свойствами (теплоемкость, теплопроводность).

Температура почвенного слоя может изменяться под действием следующих факторов:

- теплообмен с внешней средой (тепловое излучение, конвекция);
- тепловой поток в почвенном слое (теплопроводность почвы);
- процессы испарения, увлажнения, конденсации.

Если почвенный слой однороден по своим физическим свойствам и не содержит археологических объектов, то картина теплового контраста его поверхности с фоном в различное время суток примерно одинакова.

Наличие в грунтовом слое археологического объекта с другими тепловыми характеристиками приводит к нарушению однородности тепловой картины. В почвенном слое над объектом возникают тепловые аномалии за счет изменения величины и направления теплового потока и изменения влагообмена с воздухом.

Для обнаружения тепловых аномалий используют пирометры и тепловизоры. Пирометр измеряет температуру в одной локальной точке исследуемой поверхности и дает результат измерения в цифровом виде. Тепловизор представляет собой камеру, снимающую изображение в инфра-

красном диапазоне (ИК-спектр).

Тепловизионная съемка дает двухмерную тепловую картину исследуемой поверхности с окрашенными в различные цвета зонами. Пирометр является более точным и информативным прибором доступной стоимости, в отличие от тепловизора, стоимость которого намного выше стоимости пирометра.

Выделение аномальных тепловых сигналов от археологических объектов со слабым тепловыделением на фоне более сильных тепловых шумов производится путем преобразования двумерного распределения температуры в одномерную функцию, которая является сверткой термограммы по координатам и содержит в себе весь объект измерения или фрагмент его поверхности.

Введенная функция-свертка, как и исходная термограмма, несет информацию о тепловом состоянии исследуемого объекта, скрытых источниках тепловыделения, взаимодействии с окружающей средой, статистических параметрах излучаемой поверхности и искажениях, вносимых самой измерительной системой.

Нормированный график этой функции («образ» термограммы) является гистограммой распределения площади по температурному диапазону и позволяет определить наиболее вероятные значения температурных аномалий, вносимых археологическими объектами.

ГЕОРАДАРЫ

Результаты георадиолокации с помощью георадаров имеют большое внешнее сходство с данными, получаемыми при сейсмической разведке по методу отраженных волн. В основе сходства результатов сейсмического и радиолокационного зондирования геологической среды лежит кинематическая аналогия процессов волнового распространения акустических волн в твердом теле и электромагнитных волн в материальной среде.

Это позволяет применять известные в сейсморазведке методы цифровой обработки сигналов к результатам радиолокационного зондирования.

Вместе с тем применяются и другие специфические методы обработки данных, в частности, такие, которые разработаны для цифровой обработки изображений. В конечном итоге по линиям наблюдений получают электромагнитные разрезы, внешне напоминающие сейсмические.

При исследовании археологических памятников, георадары дают возможность бесконтактным способом обнаруживать скрытые помещения, фундаменты сооружений, места разрушения конструкции памятника. Использование георадаров эффективно в тех случаях, когда масштабные раскопки абсолютно невозможны (например, в условиях плотной городской застройки или на уникальных исторических объектах).

Один из самых известных примеров использования георадара в археологии — обнаружение с его помощью в 2016 году могилы английского короля Генриха I. Место захоронения было обнаружено на автомобильной парков-

ке Редингской тюрьмы, раньше эта территория принадлежала Редингскому аббатству.

Ранее, в 2012 году, под муниципальной парковкой в городе Лестере археологи нашли могилу другого английского короля, знаменитого Ричарда III.

На Рис. 11 показана наземная радиолокационная съемка археологического памятника. Колесо георадарной установки, расположенное за приемо-передающими антенными блоками, является одометром, который управляет процессом сбора данных измерений.



Рис. 11 – Ground penetrating radar survey. The wheel trailing behind the transmitter/receiver antennas is an

odometer that contrls data collection. Author: Archaeo-Physics LLC. Public Domain.

На Рис. 12 приведен двухмерный профиль георадара (радарограмма), показывающий структуру подземного склепа на историческом кладбище на разной глубине. Куполообразную крышу склепа можно увидеть на глубине от 1 до 2,5 метров.

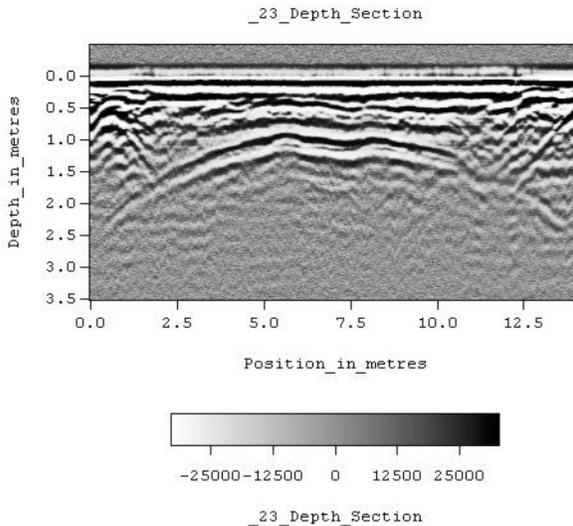


Рис. 12 – склеп на историческом кладбище. CC BY-SA 3.0. Author: Tapatio. Licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.

К недостаткам применения георадаров в археологических исследованиях можно отнести:

– Нестабильность работы в грунтах, содержащих мелкозернистые осадочные породы с высокой проводимостью (глины или наносы);

- Резкое снижение чувствительности при высоком уровне грунтовых вод;
- Сильное рассеяние сигнала на скальных и разнородных включениях в грунте;
- Относительно высокое потребление энергии, неудобное при проведении полевых работ;
- Высокие временные затраты на настройку и обработку данных георадаров по сравнению с простой техникой магнито- и электроразведки;
- Сложность и высокая стоимость аппаратуры.

Некоторые специалисты даже считают нецелесообразным использовать георадары для ежедневных полевых работ, предпочитая пользоваться обычными методами инженерной геофизики, или другими доступными средствами, такими как металлоискатели или глубинные детекторы индукционного типа.

ГЛАВА 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

В зависимости от исходных задач и сложности проведения работ на местности, подбирается подходящая измерительная аппаратура (магнитометры, электроразведочные установки, металлодетекторы, электротомографы, сейсмотомографы, георадары) и программное обеспечение для обработки данных.

АППАРАТУРА

Современная магниторазведочная аппаратура представлена высокочувствительными квантовыми магнитометрами и градиенто-метрами на их основе. В качестве примера можно привести квантовый магнитометр G-864 компании Geometrics.

Цезиевый магнитометр G-864 использует модифицированный Android-планшет Getac ZX70 в качестве консоли данных. Планшет Android включает в себя современный

пользовательский интерфейс, обеспечивает связь по WiFi, GPS-навигацию и и возможность предварительной загрузки профилей съемки вместо использования традиционных рулеток и вешек для создания профилей в полевых условиях.

Регистрация данных измерений с помощью беспроводной платформы исключает возможность зацепления или разрыва кабеля во время съемки. Программное обеспечение G-864 позволяет пользователям визуализировать собранные данные в виде цветной карты георазреза.

<https://www.geometrics.com/product/g-864-magnetometer/>

Одним из лучших профессиональных образцов электро-разведочной аппаратуры на современном рынке является электротомограф Syscal R1 Plus компании IRIS Instruments.

Syscal R1 Plus специально разработан для разведки на средних глубинах. Он сочетает в себе источник питания, передатчик с выходной мощностью до 200 Вт и двухканальный приемник в одном устройстве. Различные коммутационные карты позволяют работать с 24 (Switch-24) до 72 (Switch-72) электродами. Измеренные данные могут быть загружены и обработаны с помощью программного обеспечения для ПК (Prosys II, поставляемого с Syscal).

Процесс измерений полностью автоматический и управляется микропроцессором. Внутренняя память может хранить полную информацию об напряжении питания, измеренных значениях удельного сопротивления почвы и других параметров. Последовательная связь позволяет передавать данные на микрокомпьютер для построения графиков и интерпретации данных.

<http://www.iris-instruments.com/syscal-r1plussw.html>

SUMMIT M Vipa – трехканальная сейсмостанция для вибро- и сейсмического мониторинга, с дополнительным каналом для шумомониторинга. Станция имеет встроенный литий-ионный аккумулятор, наличие пульта дистанционного управления с автоматической передачей данных позволяет подключить несколько станций по Ethernet или с помощью радиоканала для создания сети вибромониторинга. 24-битный АЦП с высоким разрешением обеспечивает широкий динамический диапазон и сверхчувствительный мониторинг вибрации как для непрерывной, так и для триггерной записи. К сейсмостанции подключен сейсмометр DMT-3D/DIN, оснащенный тремя геофонами с диапазоном частот от 1 до 315 Гц.

Сигналы от внешнего источника сейсмических волн проходят через поверхностный почвенный слой, регистрируются сейсмометром DMT-3D/DIN и подаются на сейсмостанцию SUMMIT M Vipa для дальнейшей обработки и картирования.

<https://geodevice.co/product/summit-m-vipa/>

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Пакет программ Zond разработан компанией Zond Software LTD и может использоваться для интерпретации геофизических данных при решении различных задач малоглубинной археогеофизики.

<https://zond-geo.com/>

ArchaeoFusion – программа для археологов и других специалистов, которые используют георадары для опера-

тивного картирования и локализации археологических и других объектов в слое грунта.

<https://archaeofusion.com/>

Snuffler – Программа для обработки и анализа данных, полученных при магнитных и электротомографических съемках.

<http://www.sussexarch.org.uk/geophysics/snuffler.html>

OpendTect – система интерпретации сейсмических данных с открытым исходным кодом для визуализации, анализа и интерпретации сейсмических данных. Пакет используется также для интерпретации георадарных данных.

<https://www.dgbes.com/software/opendtect>

Обширный спектр измерительной аппаратуры и программного обеспечения, которые могут с успехом использоваться в археогеофизике даны по ссылке:

<https://geodevice.ca>

Определяющим фактором подбора необходимой аппаратуры и программного обеспечения для археогеофизических исследований является оптимизация по соотношению цена/качество. Во многих случаях вместо сложных и дорогих измерительных систем можно использовать простой металлодетектор или магнитометр.

Поэтому, в археофизических исследованиях наибольшую популярность приобрели недорогие приборы и устройства, основанные на легко реализуемых методах прикладной геофизики.

Ниже приводится проект действующего макета магнитометра. Макет и программный код созданы в демонстрационных целях и не предназначены для коммерческого использования.

МАКЕТ МАГНИТОМЕТРА

НАЗНАЧЕНИЕ

Устройство предназначено для измерения составляющих напряженности геомагнитного поля, а также вычисления модуля геомагнитного поля и его градиента. С помощью этого устройства возможно обнаружение магнитных аномалий, создаваемых археологическими объектами, обладающими магнитными свойствами.

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Оценка величин модуля напряженности и градиента модуля напряженности слабых постоянных магнитных полей, сравнимых с геомагнитным полем; поиск и обнаружение намагниченных объектов в верхнем слое грунта; предварительная магнитная съемка модуля напряженности поля и его градиента; составление предварительных магнитных карт местности.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Устройство состоит из трехосевого магниторезистивного модуля HMC5883L, платформы для разработки Raspberry Pi Pico (с микроконтроллером RP2040) и консоли (Galaxy Tab A7).

Модуль HMC5883L:

- Диапазон измерений (mT): ± 0.8 ;
- Разрядность преобразования: 12;
- Точность (nT): ± 200 ;
- Цифровой интерфейс: I2C;

- Скорость опроса (раз в сек): до 160;
- Время одного измерения (мсек): 6;
- Напряжение питания (V): 3.3–5;
- Потребляемый ток (мА): <0.1;
- Габаритные размеры (мм): 18x14x5.

Платформа Raspberry Pi Pico:

- Двухядерный процессор Arm Cortex-M0+;
- Тактовая частота (МГц): 133;
- Оперативная память (Кб): 264;
- Flash-память (Мб): 2;
- 12-битный АЦП;
- 30 GPIO портов;
- Порт MicroPython для RP2040;
- Поддержка MicroPython/Thonny;
- Напряжение питания через микро-USB порт (V): 5;
- Напряжение питания через выход VSYS (V): 1,8–5,5;
- Max. потребляемый ток (мА): <100;
- Габаритные размеры (мм): 52.7x21x3.7.

Samsung Galaxy Tab A7 Lite:

- Диагональ дисплея (дюйм): 8.7;
- Разрешение дисплея (пикс.): 800x1340;
- Встроенная память (Гб): 32;
- Операционная система: Android 13;
- Wi-Fi (802.11) a/b/g/n/ac;
- Bluetooth: 5.0, A2DP, LE;
- Емкость (мАч): 5100;
- Высота (мм): 212.5;
- Ширина (мм): 124.7;
- Толщина (мм): 8;
- Вес (г): 370.

Питание измерительного и электронного модулей осуществляется путем их подключения к внешней консоли

(Galaxy Tab A7) через микро-USB порт. Консоль работает в автономном режиме от собственной аккумуляторной батареи, зарядка аккумулятора консоли осуществляется от адаптера питания с кабелем USB – micro USB (1.55 A @ 5.0 V).

Время установления рабочего режима не более 5 сек.

Средний потребляемый ток (без внешней консоли):
– Не более 50.0 mA (@5 V, MicroPython);

Длина соединительного кабеля (м): 0.6;
Габаритные размеры контейнера (мм): Ø60 x 150;
Габаритные размеры штанги (мм): Ø12 x 60;
Масса (кг): <0.2 (без внешней консоли).

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Трехосевой магниторезистивный модуль HMC5883L соединен с электронным модулем Pico/RP2040, оба модуля помещены в пластиковый немагнитный контейнер. Магниточувствительные преобразователи магниторезистивного модуля расположены так, чтобы расстояние между преобразователями и нижней крышкой контейнера было минимальным. Магниточувствительный модуль может быть размещен параллельно или перпендикулярно поверхности грунта.

Электронный модуль соединен специальным кабелем с консолью Galaxy Tab A7, с помощью которой производится питание всех модулей устройства и управление процессом измерений.

Контейнер присоединен к немагнитной штанге, в торце которой находится кнопка «Пуск» для запуска измерительного процесса. В верхней части контейнера расположен

светодиод для индикации начала и окончания процесса измерений.

Измерительные модули и электронный блок могут питаться автономно, без подключения к внешней консоли. Автономное питание осуществляется с помощью внешнего источника питания (батареи).

В конструкции модуля HMC5883L используется анизотропная магниторезистивная (AMR) технология, позволяющая производить точные измерения магнитного поля по трем различным осям (X, Y и Z) и угол между направлением профиля и магнитным склонением (азимут профиля), с последующим вычислением полного модуля поля и его градиента.

Управление процессом измерений производится программным путем. Полученные данные можно визуализировать на мониторе консоли с помощью специальной программы для двух- или трехмерной интерпретации (2D и 3D модели) или карт изолиний.

Основные модули устройства, электрическая принципиальная схема и программный код приведены в Приложении.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

1. Подключить измерительный и электронный модули к консоли через входной разъем платы Raspberry Pi Pico кабелем micro-USB.

2. Поместить корпус устройства с магниточувствительным модулем в начальную точку (пикет) выбранного профиля и нажать кнопку «Пуск». При нажатии кнопки загорается красный индикаторный светодиод на корпусе

электронного блока, зуммер издает звуковой сигнал и начинается процесс измерения компонент магнитного поля, с последующим вычислением его модуля и градиента.

По окончании измерения красный светодиод гаснет, зуммер снова издает звуковой сигнал, это означает что установка готова к измерениям на следующем пикете.

3. Начать перемещение вдоль выбранного профиля, производя измерения на каждом отдельном пикете. Программный код будет выполнять периодические измерения (отсчеты) компонент поля и азимут профиля, а также вычислять модуль напряженности поля и его градиент.

Число пикетов, отсчетов на каждом пикете, а также время измерений задается в программном коде до начала измерений. На каждом пикете выбранного профиля можно произвести от 1 до 10 измерений.

4. Результаты измерений записываются в виде текстовых файлов и хранятся во Flash-памяти микроконтроллера RP2040. При необходимости, текстовые файлы с данными измерений могут быть скопированы или перемещены из памяти микроконтроллера в специальную папку, организованную в файловой системе консоли.

Формат файла с данными измерений:

Дата/Время | Пикет | Отсчет | Азимут (°) | T (uT) | $|\Delta T|$ (uT)

Например, если в программном коде указаны следующие параметры:

– Число пикетов: 10;

– Число измерений на каждом пикете: 10;

то массив данных измерений (в текстовом формате) будет содержать 100 строк, каждая из которых будет содержать информацию о номере пикета и соответствующими данными измерений.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Съемка проводилась по предварительно подготовленной сети в дневное время, на ровном участке открытой местности размерами 1.5х1.5 м, с шагом профильной сетки 20х20 см.

- количество профилей: 7;
- количество пикетов на каждом профиле: 10;
- количество отсчетов на каждом пикете: 5.

Тип почвы – суглинок, поверхностный горизонт гумусного типа, равномерно покрытый травяным слоем. Влажность почвы по предварительным оценкам составляла 20 – 30%, при температуре воздуха 23 С.

В приповерхностном слое исследуемой площадки на глубине 100 мм были заранее размещены посторонние объекты:

- 2 неодимовых магнитных диска (Ø12х 5 мм);
- стальная полоска (150х20х0.5 мм).

На карте изолиний магнитного поля исследуемого участка отчетливо выделяются три аномальные зоны, вносимые магнитными дисками и стальной полоской (Рис. 13):

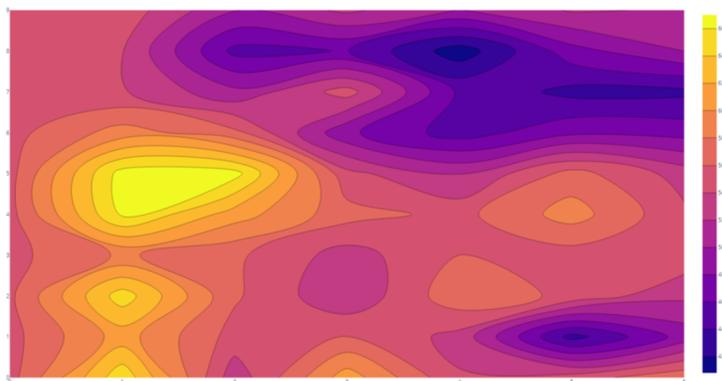


Рис. 13 – Карта изолиний магнитного поля исследуемого участка.

Объект	Профиль	Пикет	Мах. значение аномального поля(уТ)	Нормальное поле (уТ)	Направление вектора аномалии
Неодимовый диск1	1	5	66.8	57.6	Совпадает с нормальным полем
Неодимовый диск2	4	8	42.4	57.6	Противоположно нормальному полю
Стальная полоска	5	1	40.8	57.6	Противоположно нормальному полю

Полученные результаты имеют статус демонстрационного теста для оценки неоднородности магнитных свойств исследуемого участка грунта. Для точных измерений и анализа необходимо использовать профессиональную аппаратуру и пакеты программ для микромагнитных съемок и обработки магнитометрических данных.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МОДУЛИ И СХЕМА МАКЕТА

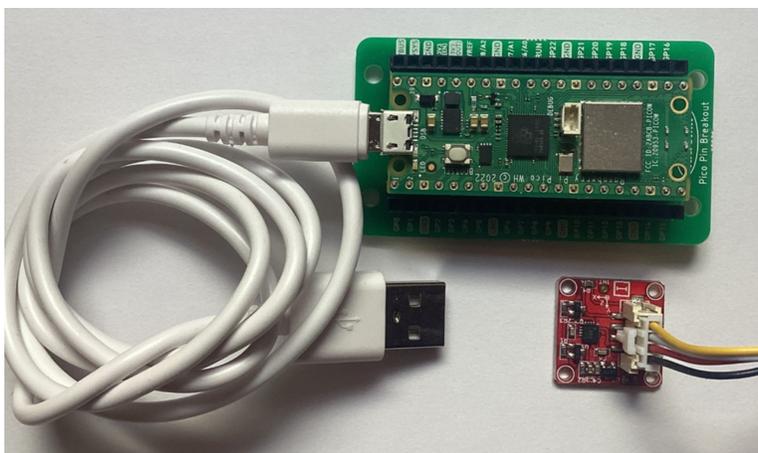


Рис. 14 – Общий вид модулей макета магнитометра.

Микропроцессор Pico/RP2040 размещен на плате Kitronik и соединяется с консолью с помощью Micro-USB кабеля. Модуль HMC5883L соединяется с Pico/RP2040.

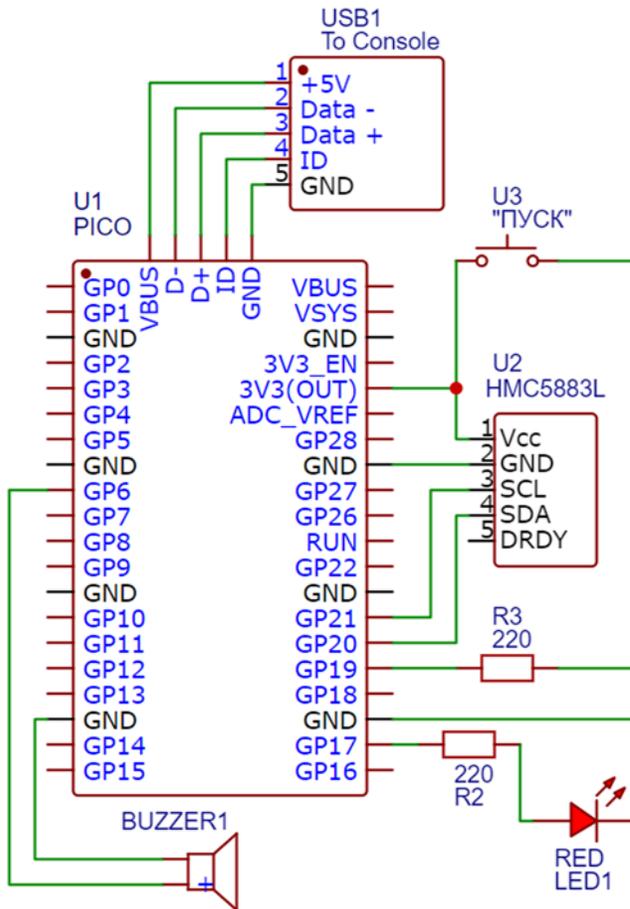


Рис. 15 – Принципиальная электрическая схема магнитометра.

ПРОГРАММНЫЙ КОД

```
#magnetometer.py

from machine import I2C, Pin, PWM
from utime import localtime
import time
import math

# HMC5883L address and register addresses
HMC5883L_ADDR = 0x1E
CONFIG_REG_A = 0x00
CONFIG_REG_B = 0x01
MODE_REG = 0x02
DATA_REG = 0x03

# Conversion factor from raw value to uT
# With default gain 1 Ga = 1090 LSB
# And 1 Ga = 100 uT, therefore 1 LSB = 100 uT / 1090 LSB
LSB_TO_UT = 100.0 / 1090.0

# Initialize I2C
i2c = I2C (0, scl=Pin (21), sda=Pin (20), freq=400000)

# Check if HMC5883L is connected
if HMC5883L_ADDR not in i2c.scan ():
    raise ValueError («HMC5883L not found»)

# Write configuration to HMC5883L
i2c. writeto_mem (HMC5883L_ADDR, CONFIG_REG_A,
bytes ([0x70]))
i2c. writeto_mem (HMC5883L_ADDR, CONFIG_REG_B,
bytes ([0x20]))
```

```
i2c.writeto_mem (HMC5883L_ADDR, MODE_REG, bytes
([0x00]))
```

```
#Initialize button PIN19 GPIO
button = machine.Pin(19,machine.Pin.IN,machine. Pin.
PULL_DOWN)
led_red = machine. Pin (17, machine. Pin. OUT)
```

```
#Initialize passive buzzer
BUZZER_PIN = 6 # (+) to GP6, (-) to GND
buzzer = PWM (Pin (BUZZER_PIN, Pin. OUT))
```

```
numpickets = 10
numcounts = 5
```

```
def playNote (frequency, duration, pause) :
global buzzer
#adjust loudness: smaller number is quieter.
buzzer.duty_u16 (8000)
buzzer.freq (frequency)
time.sleep (duration)
buzzer.duty_u16 (0) # loudness set to 0 = sound off
time.sleep (pause)
```

```
def write_count (out_file: file, picketnum: int, countnum:
int, prev_mod):
data = i2c.readfrom_mem (HMC5883L_ADDR,
DATA_REG, 6)
x = ((data [0] <<8) | data [1])
z = ((data [2] <<8) | data [3])
y = ((data [4] <<8) | data [5])
```

```
if x> 32767:
x -= 65536
if y> 32767:
```

```

y -= 65536
if z > 32767:
z -= 65536

# Convert to uT
x *= LSB_TO_UT
y *= LSB_TO_UT
z *= LSB_TO_UT

# Calculate heading in degrees
heading = math.atan2 (y, x)

# Convert radian to degree
heading = math.degrees (heading)

# If you know the declination in your area, put it
instead 0.0
declination_angle = 0.0
heading += declination_angle

# Correct negative values
if heading < 0:
heading += 360

fieldmod = math. sqrt (math. pow (x,2) + math. pow (y,2)
+ math. pow (z,2))
gradient = fieldmod – prev_mod
year, month, day, hour, mins, secs, weekday, yearday =
time. localtime ()
print («Дата/Время | Пикет |Отсчет | X (uT): %.2f uT, Y
(uT): %.2f uT, Z (uT): %.2f uT, Азимут: %.2f° Модуль: %.2f,
Градиент: %.2f» % (x, y, z, heading, fieldmod, gradient))
out_file. write («{} – {:02d} – {:02d} {}:{}:{}".format (year,
month, day, hour, mins, secs) +», " + str (picketnum) +», " + str
(countnum) +», " + str (heading) +», " + str (fieldmod) +», " +

```

```

str (gradient) + "\r\n»)
time.sleep (1.8)
return fieldmod

def write_picket (cur_picket: int):
    print («Writing picket " + str (cur_picket))
    playNote (2093, 0.2, 0.2)
    picket_output_file = open («picket» + str (cur_picket) +».
csv», «w»)
    picket_output_file. write («Дата/Время, Пикет, Отсчет,
Азимут, Модуль, Градиент\r\n»)
    res = 0
    for count_num in range (0,numcounts):
        res = write_count (picket_output_file, cur_picket,
count_num, res)
    picket_output_file.close ()
    playNote (1047, 0.5, 0.5)

#MAIN PROGRAM BELOW:
cur_picket = 1
while cur_picket <= numpickets:
    if button.value () == True:
        led_red. high ()
        write_picket (cur_picket)
        led_red. low ()
        cur_picket += 1
    elif button.value () == False:
        time.sleep (0.05)
    notes = [1047, 1319, 1568, 2093, 1568, 1319, 1047,
1319, 1568, 2093]
    for note in notes :
        playNote (note, 0.05, 0.05)

```

УСТАНОВКА СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ (IDE)

Для запуска MicroPython скриптов необходимо установить приложение Micro REPL, которое можно найти на сайте сервиса приложений Google Play Store по следующей ссылке: <https://play.google.com/>.

Приложение Micro REPL является средой разработки (IDE) в системе Android, и устанавливается на планшете или мобильном телефоне. Приложение имеет: терминал для доступа к интерактивному интерпретатору, менеджер файлов и редактор MicroPython-скриптов.

Порядок установки приложения следующий:

- Подключите Raspberry Pi Pico к планшету (Galaxy A7 Lite);
- Откройте страницу сервиса приложений Google Play Store;
- Найдите и установите приложение Micro REPL;
- Разместите нужные скрипты используя менеджер файлов.

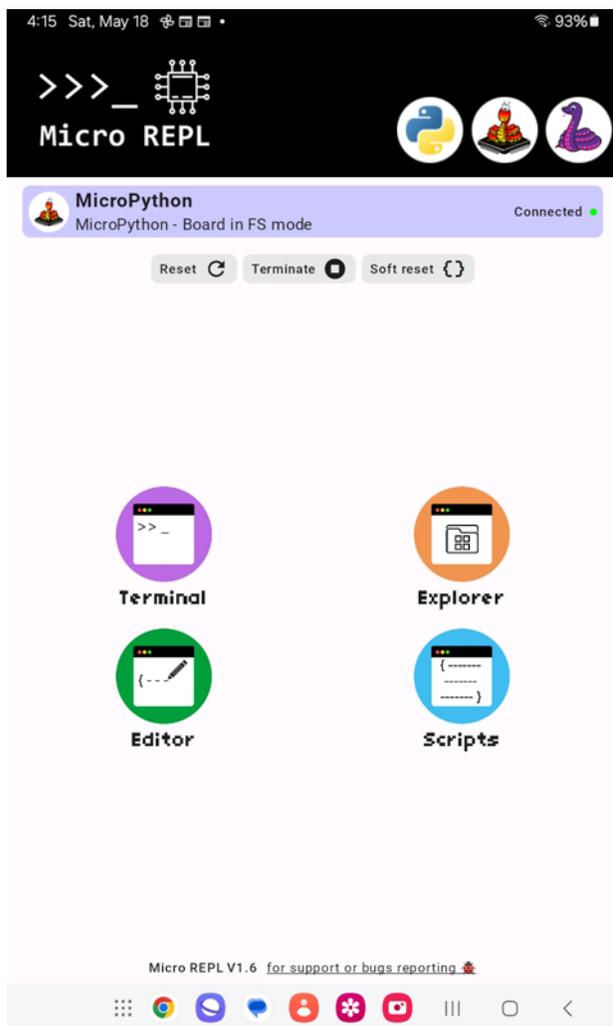


Рис. 16 – Micro REPL (скриншот 1).

```
4:25 Sat, May 18 92%
MicroPython:// magnetometer.py
1 OKfrom machine import I2C, Pin, PWM
2 from utime import localtime
3 import time
4 import math
5
6 # HMC5883L address and register addresses
7 HMC5883L_ADDR = 0x1E
8 CONFIG_REG_A = 0x00
9 CONFIG_REG_B = 0x01
10 MODE_REG = 0x02
11 DATA_REG = 0x03
12
13 # Conversion factor from raw value to uT
14 # With default gain 1 Ga = 1090 LSB
15 # And 1 Ga = 100 uT, therefore 1 LSB = 100 uT
16 LSB_TO_UT = 100.0 / 1090.0
17
18 # Initialize I2C
19 i2c = I2C(0, scl=Pin(21), sda=Pin(20), freq=40000)
20
21 # Check if HMC5883L is connected
22 if HMC5883L_ADDR not in i2c.scan():
23     raise ValueError('HMC5883L not found')
24
25 # Write configuration to HMC5883L
26 # Continuous measurement mode, 15Hz data output
27 i2c.writeto_mem(HMC5883L_ADDR, CONFIG_REG_A,
```

Рис. 17– Micro REPL (скриншот 2).

ЛИТЕРАТУРА

Бобачев А. А., Большаков Д. К., Модин И. Н. Электроразведка М.: МГУ, 2013. – 123 с.

Воскресенский Ю. Н. Полевая геофизика. М.: Недра, 2010. – 479 с.

Восс О., Мельников А. В., Смекалова Т. Н. Магнитная разведка в археологии. 12 лет применения Оверхаузеровского градиентометра GSM-19WG. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 73 с.

Журбин И. В. Геофизика в археологии: методы, технология и результаты применения. Ижевск, 2004. – 152 с.

Кошелев И. Н., Магнитная разведка археологических памятников. Киев, 2005. – 313 с.

Мартынов А. И. Археология. М.: Высш. шк., 2008. – 447 с.

Модин И. Н. Электроразведка в технической и археологической геофизике. М.: МГУ, 2010. – 274 с.

Франтов Г. С., Пинкевич А. А. Геофизика в археологии. Л.: Недра, 1966. – 212 с.

Якубовский Ю. В., Ренард И. В. Электроразведка. М.: Недра, 1991. – 358 с.

Й. В. Е. Фассбиндер. МАГНИТОМЕТРИЯ В АРХЕОЛОГИИ – ОТ ТЕОРИИ К ПРАКТИКЕ. «Российская Археология», 2019, №3, с. 75–91.

H. Becker, Jörg W. E. Fassbinder. Magnetic Prospecting in Archaeological Sites. ICOMOS, 2001 – Archaeology – 102 p.

Imma Ollich-Castanyer. Archaeology, New Approaches in Theory and Techniques. IntechOpen, 2012, 306 p.

Lawrence B. Conyers. Ground-penetrating Radar for Archaeology. Rowman Altamira, 2004, 203 p.

S.Campano, S. Piro. Seeing the Unseen: Geophysics and Landscape Archaeology. CRC Press, London, 2008. 376 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	6
МИКРОМАГНИТНАЯ СЪЕМКА	9
ЭЛЕКТРОПРОФИЛИРОВАНИЕ	15
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ	18
ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИЯ	21
МЕТОД НЕЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЕТЛИ	22
МЕТОД БИЭП	25
СЕЙСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА	26
ТЕРМОСЪЕМКА	29
ГЕОРАДАРЫ	31
ГЛАВА 2. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА	35
АППАРАТУРА	35
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	37
МАКЕТ МАГНИТОМЕТРА	39
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ	44
ПРИЛОЖЕНИЕ	46
МОДУЛИ И СХЕМА МАКЕТА	46
ПРОГРАММНЫЙ КОД	48
УСТАНОВКА СРЕДЫ РАЗРАБОТКИ (IDE)	52
ЛИТЕРАТУРА	55

Виктор Харебов

Геофизические методы в археологии
Методы прикладной геофизики в археологических
исследованиях

ISBN 978-5-0062-9612-1



Rideró

Rideró.ru – издай
книгу бесплатно!