Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 2

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПИЧНЫХ ДЛЯ КУРГАНОВ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНФИГУРАЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СТРУКТУР 6

1.1 Изучение глубинности и разрешающей способности различных электродных установок и их комбинаций в электротомографии 6

1.2 Изучение глубинности и разрешающей способности малоглубинных частотных зондирований в двух и трехслойных одномерных моделях 11

1.3 Многоэкстремальный сигнал от локальных приповерхностных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками .16

1.3.1 Математическое моделирование 16

1.3.2 Пример полевых данных 22

2 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЙ ПОЛИГОН 22

2.1 Экспериментальные исследования. Комплексные полевые испытания, апробация комплексной методики обработки и интерпретации данных малоглубинных частотных зондирований и электротомографии 22

2.1.1 Мировая практика создания электроразведочных полигонов 23

2.1.2 Разработка конфигурации мишеней и обустройство электроразведочного полигона 26

2.2 Экспериментальные исследования. Результаты работ по сбору комплексных геофизических данных на электроразведочном полигоне и их интерпретация 30

3.2.1 Результаты работ по Блоку №1 (Профиль №1, Квадраты №№ 12 и 13). 31

2.2.2 Результаты работ по Блоку №2 (Профиль №2, Квадраты №№ 13 и 14) 34

2.2.3 Результаты работ по Блоку №3 (Профили №№ 4 и 5, Квадрат № 6). 39

2.3 Результаты работ методом электротомографии в режимах метода сопротивлений и вызванной поляризации вдоль профиля №1. 46

2.4 Дискриминация цветных и черных металлов 49

3. ПОЛЕВЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АРХЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ 52

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ КУРГАННЫХ МОГИЛЬНИКОВ 77

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 77

ВВЕДЕНИЕ

Традиция устройства надмогильных сооружений в виде насыпных холмов – курганов возникла с началом широкого освоения степи группами подвижно-оседлых скотоводов. На территории Западной Сибири курганные некрополи появляются в эпоху бронзы, а в последующие периоды курганный обряд захоронения становится здесь господствующим. Курганные могильники представляют собой компактные, четко организованные комплексы, которые всегда возводились по заранее намеченному плану. Большинство технических приемов строительства насыпей и сопутствующих конструкций, а также различные элементы курганного обряда захоронения появляются уже на начальном этапе и существуют на протяжении всего периода бытования курганов, вне зависимости от этнической принадлежности сооружавших их народов. Однако в каждую эпоху в строении курганов есть свои особенности, которые отражают не только специфику мировоззрения и уровень развития инженерной мысли и технологий, но и являются индикатором степени развития общественного устройства и материальной культуры. Помимо этого, курганные некрополи маркировали территории проживания отдельных групп населения, служили ориентирами при перекочевках и местами отправления культов. Поэтому выявление и картографирование курганных могильников дает возможность определять ареалы проживания разноэтничных групп населения и прослеживать пути их миграций. Таким образом, курганные могильники являются одним из самых информативных источников для реконструкции различных аспектов древнейшей истории человечества.

К сожалению, подавляющее большинство курганов Сибири было разграблено современниками, а затем бугровщиками в XVIII веке. Степные и лесостепные районы Западной Сибири широко осваивались русским населением, и зоны распространения курганных некрополей оказались под пашенными угодьями. Этот процесс особенно усилился с 70-х г. прошлого века, с внедрением мощной сельскохозяйственной техники. Особенно быстро разрушаются небольшие курганы, высота которых, вследствие постоянной распашки, может ежегодно уменьшаться на 5-10 см. В настоящее время, курганные группы на пашне зачастую можно обнаружить лишь по отдельным слабо сохранившимся возвышениям, а некоторые некрополи стали полностью недоступны для визуальной фиксации. Большие курганы, как правило, не распахиваются и в целом

сохраняются лучше. Но и они не застрахованы от уничтожения в результате хозяйственной деятельности, чему имеется достаточное количество примеров. В этих условиях, задача разработки новых подходов к изучению курганных некрополей становится особенно актуальной. Необходимо выработать эффективную методику, направленную не только на поиск распаханных курганов, но и на распознавание внутренней структуры насыпей, что позволило бы оптимально планировать стратегию их последующего изучения. И в этой ситуации именно развитие археолого-геофизической методики представляется наиболее перспективным.

Уже первые исследования, проведенные на курганных могильниках Западной Сибири совместным коллективом археологов и геофизиков Института археологии и этнографии СО РАН и Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН показали эффективность таких работ для решения археологических задач. Были выполнены геофизические изыскания на втором по величине в Хакассии кургане Барсучий лог (Эпов М.И., Молодин В.И. и др, 2006, с. 85-86) и курганном могильнике Бугры в Алтайском крае (Тишкин А.А., Чугунов К.В. и др., 2007, с. 215–220; Чемякина М.А., Дядьков П.Г. и др., 2007, с. 392–397). В Западной Сибири проводились широкомасштабные геофизические исследования курганных могильников Здвинск-1 и Здвинск-4 (Эпов М.И., Молодин В.И. и др, 2006, с. 85-86). На территории археологических памятников Сопка-2, Преображенка-6, Здвинск-1 удалось выявить древние курганы, там, где их рельефные признаки были полностью уничтожены распашкой (Молодин В.И., Чемякина М.А. и др., 2001, с. 399–407; Дядьков П.Г., Молодин В.И. и др., 2005, с. 304 – 309). На большинстве исследованных объектов археологические раскопки подтвердили данные геофизического мониторинга.

Вместе с тем, первые исследования показали, что работы на курганах очень перспективны и для выработки археолого-геофизической методики. При реализации совместных проектов разработана оригинальная аппаратура частотного зондирования ЭМС, превосходящая по ряду параметров известные западные аналоги. Накоплен значительный опыт работ методами частотного зондирования, сопротивлений и магниторазведки. В том числе построен математический аппарат для решения прямых и обратных задач в физических моделях, применяемых при эталонировке аппаратуры частотного зондирования, обработки и интерпретации данных (Балков Е.В., Манштейн А.К. и др., 2006, с. 43-45).

Разработаны технологии построения геоэлектрических разрезов археологических памятников с учетом рельефа и трехмерных изоповерхностей, описывающих предполагаемый контур искомого непроводящего объекта; с помощью которых были впервые в отечественной археологии выполнены и опубликованы соответствующие построения. Проведена адаптация метода сопротивлений для «бесконтактного» изучения археологических памятников, позволяющая работать в гальваническом контакте со средой за границами самого объекта. Последняя методика была выполнена для уникальных исследований многолетнемерзлых объектов в высокогорных курганах пазырыкской культуры на Алтае и в Монголии (Эпов М.И., Молодин В.И. и др., 2007, с. 407 – 412). В комплекс методов впервые в мировой практике введены геохимические методы, позволяющие диагностировать под насыпью «замерзших» курганов пазырыкской культуры наличие деревянных срубов (Эпов М.И., Молодин В.И.и др., 2008, с. 417-418).

Были предложены и опробованы новые методы магнитной съемки. К последним относится метод измерений вертикального градиента с проведением синхронных наблюдений на базовой магнитовариационной станции в районе работ, что позволяет получать значения аномального магнитного поля на двух уровнях высоты (Эпов М.И., Молодин В.И. и др, 2006, с. 77-78). Это существенно облегчает интерпретацию аномалий, вызванных археологическими объектами. Важным является и опыт комплексирования методов магнитометрии, электрометрии и частотного электромагнитного зондирования в изучении насыпей курганов.

Задачей современного этапа исследований, в рамках которой осуществлялась работа по проекту, является оптимизация археолого-геофизической методики применительно к исследованию древних курганных некрополей. Для этого необходим анализ возможностей каждого геофизического метода, оптимальный для каждого метода выбор археологических поисковых задач и условий структурно-вещественного состава почвы в районе работ, уровня помех, в том числе за счет неровностей дневной поверхности. В конечном итоге, на основе исследований природы тех или иных геофизических аномалий, связанных с археологическими объектами, требуется разработка оптимальной системы применения комплексных методов для наилучшего обеспечения обнаружения древних курганов и получения необходимой информации об их структурных параметрах. Для этого необходимо создать модели базовых типов различных курганов и вмещающей эти объекты среды – ее структуры, электромагнитных и магнитных свойств. Зачастую применение

неверных подходов к использованию геофизических методов в археологии, приобретение неэффективной для конкретных памятников аппаратуры приводит к неполным, либо отрицательным результатам и значительно увеличивает стоимость археологических работ. Вместе с тем, из опыта предыдущих работ следует, что ряд геофизических методов после соответствующей адаптации можно успешно применять для получения достаточно полной характеристики структуры археологических памятников, позволяющей оптимально планировать стратегию исследования археологического объекта. Кроме того, эффективность археогеофизических исследований зависит не только от методики измерений, но и методов археологической интерпретации геофизических данных (Журбин И.В., 2004, с.71).

В качестве полигонов для интеграционных исследований в пределах различных природно-ландшафтных зон были отобраны древние некрополи различной степени сохранности, разнообразные по своему строению и размерам и принадлежащие к различным культурно-хронологическим периодам. Работы производились на археологических памятниках Барабинской лесостепи, а также Барнаульского и Новосибирского Приобья. Часть из них была исследована экспедициями Западно-Сибирского отряда Северо-Азиатской комплексной экспедиции ИАЭТ СО РАН (Барабинская лесостепь) и Алтайского госуниверситета (Барнаульское Приобье). Археологические работы произведены на современном методическом уровне с привязкой к геофизической разметке и топографическому плану для корректного сопоставления результатов. Такой подход обеспечивал не только возможность проверки геофизических построений, но и позволял оптимизировать и мобильно корректировать комплекс геофизических методов. Наблюдение за стратиграфической ситуацией на памятниках велось как по стенкам раскопов, так и по специально оставленным для этой цели бровкам. Разборка культурных слоев осуществлялась горизонтами, с графической и фотографической фиксацией всех находок. Все индивидуальные находки, развалы сосудов и скопления массового материала наносились на план раскопа как археологические объекты. Исследование заполнения ям, разборка объектов также проходила послойно и по горизонтам, с фиксацией стратиграфических разрезов. Нивелировка раскопов производилась с привязкой к единому «0».

1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТИПИЧНЫХ ДЛЯ КУРГАНОВ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНФИГУРАЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СТРУКТУР

1.1 Изучение глубинности и разрешающей способности различных электродных установок и их комбинаций в электротомографии

Глубинность, разрешающая способность и помехоустойчивость являются ключевыми моментами при выборе типа установки для работы методом элетротомографии. В данном разделе приведены характеристики различных установок, полученные в результате широкого анализа научно-технической литературы, а также результаты собственных теоретических изысканий.

В работе [Loke, 2009] приводится следующая характеристика стандартных установок. Установка Веннера характеризуется высоким уровнем сигнала, хорошей чувствительностью к горизонтальным границам, плохой чувствительностью к вертикальным границам, средней эффективной глубинностью (a/2) и малым горизонтальным покрытием, изучаемой области. Дипольная установка характеризуется низким уровнем сигнала, хорошей чувствительностью к вертикальным границам, средней чувствительностью к горизонтальным границам, глубинностью на 20 % меньшей, чем у Веннера и средним горизонтальным покрытием. Установка Шлюмберже обладает одинаковой чувствительностью к горизонтальным и вертикальным границам, являясь компромиссом между установками Веннера и дипольной, глубинностью на 10% большей, чем у Веннера и средним горизонтальным покрытием. Двухэлектродная установка обладает наибольшим горизонтальным покрытием и глубинностью, однако имеет наихудшее разрешение и существенную зашумленность. Трехэлектродная установка, также как и двухэлектродная, имеет хорошее горизонтальное покрытие и большую глубинность, сочетая это с помехоустойчивостью и высоким уровнем сигнала. Аналогично дипольной трехэлектродная установка имеет большую чувствительность к горизонтальным неоднородностям. Асимметрия установки может привести к асимметрии результата инверсии, однако этого можно избежать, комбинируя измерения «прямой и обратной» трехэлектродными установками.

В публикации [Dahlin and Zhou, 2004] проводится теоретический анализ разрешающей способности десяти различных типов установок для 2D электротомографии. В результате подробного анализа на различных синтетических моделях делается вывод о том, что наиболее эффективными необходимо считать градиентные, трехэлектродную, дипольную установки, а также установку Шлюмберже.

В работе [Бобачев и др., 2005] проводится аналогичная классификация стандартных установок с близкими по существу выводами, дополнительно гласящая о том, что основным путем повышения эффективности полевых наблюдений является комбинированная съемка с несколькими установками и совместная обработка полученных данных. Наиболее эффективным является комбинирование прямой и обратной трехэлектродной установки, альтернативой является комбинирование установок Шлюмберже и дипольной.

В результате теоретических и экспериментальных исследований [Candansayar and Basokur, 2001] авторы рекомендуют использование прямой и обратной трехэлектродной установки, которая обеспечивает наибольшую глубинность и разрешающую способность среди стандартных установок. В последующей своей работе [Candansayar, 2008] автор показывает, что комбинированная инверсия произвольных пар стандартных установок повышает разрешающую способность по сравнению с индивидуальной инверсией. Кроме того, показано, что комбинированная инверсия прямой и обратной трехэлектродной установки с дипольной установкой дает результат, превосходящий результаты комбинированной инверсии любой пары стандартных установок.

В процессе развития метода сопротивлений было предложено и практически опробовано большое число различных установок. Каждая из них имеет свои особенности и предназначена для решения определенного рода задач. В работе [Szalai and Szarka, 2008] в результате широкого анализа научной литературы проведена классификация всех опубликованных типов установок. Работа описывает 102 установки. Классификация ведется по трем основным признакам – линейности системы электродов (коллинеарности), присутствию более 2х токовых электродов (фокусирующие установки), присутствию более 2х измерительных электродов (дифференциальные установки) – и их пересечениям. В силу того, что многоэлектродная электроразведочная коса для электротомографии имеет фиксированный арифметический шаг между электродами, на применяемые в этом методе установки должны быть наложены соответствующие

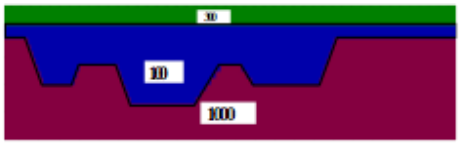
ограничения. Поэтому вполне актуально провести анализ выделенных в упомянутой классификации установок на предмет применимости для электротомографии, а также изучить особенности их применения и разрешающую способность.

Сравнение установок электротомографии на синтетических данных. Для исследования возможностей стандартных установок метода электротомографии при картировании рельефа плотика было проведено моделирование и последующая инверсия на модели золотосодержащего месторождения. Геоэлектрическая модель россыпного месторождения, построенная на базе опорного геологического профиля с априорными значениями удельного сопротивления слоев, представлена на рис. 1.

С помощью программного обеспечения Res2DMod (v 3.0) было проведено моделирование сигналов для шести типов установок. Далее синтетические данные для этих установок и некоторых их комбинаций были обращены с помощью программы Res2DInv (v. 3.55). Использовался алгоритм робастной инверсии с семью итерациями и расширенной до прямоугольной пространственной сетки. Результаты инверсии в виде геоэлектрических разрезов для 10 различных установок и их комбинаций приведены на рис. 3.

Наилучшее воспроизведение исходной модели, а значит и разрешающая способность, достигается дипольной установкой (DD). Разрешающая способность трехэлектродной (PD) несколько ниже. Разрешение, полученное установками Шлюмберже и Веннера – значительно ниже, при несущественном превосходстве Шлюмберже и Веннера γ-типа. Трехэлектродная установка имеет существенно большую эффективную глубину исследования, превосходя остальные установки в 1.5-2.5 раза. Двухэлектродная установка имеет наибольшую глубину, соизмеримую с максимальным разносом электродов. Мультиградиентной установке соответствует эффективная глубина, несколько превосходящая глубину установки Шлюмберже, и достаточную разрешающую способность. При этом мультиградиентная установка наиболее адаптирована для применения с многоканальными электроразведочными станциями, позволяет выполнять измерения значительно быстрее, чем при работе стандартными установками. Необходимо отметить что сигнал от дипольной установки является второй пространственной производной потенциала, то установка чувствительна к подповерхностным неоднородностям. Этот недостаток при наличии неоднородностей верхней части разреза существенно снижает разрешающую способность и глубинность дипольной установки.

Результаты комбинированной инверсии превосходят по качеству воспроизведения исходной модели результаты соответствующих индивидуальных инверсий. Так комбинирование трехэлектродной и дипольной (PD+DD) установок при сохранении глубины исследования повышает итоговую разрешающую способность. Совместная инверсия установок Шлюмберже и дипольной (SC+DD) повышает вертикальное разрешение дипольной установки. Использование установок Веннера актуально в случае высокого уровня помех и, аналогичным образом, в комбинациях приводит к улучшению результата инверсии.



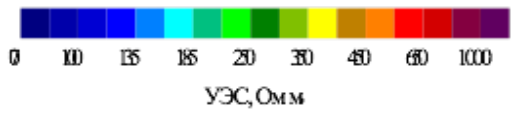


Рис. 1. Геоэлектрическая модель, имитирующая изменяющийся рельеф плотика (УЭС 1000 Ом·м), перекрытого двухслойными аллювиальными отложениями (УЭС 300 и 100 Ом·м). Результаты индивидуальной и комбинированной инверсии синтетических данных, для различных установок: Шлюмберже (SC), дипольной (DD), двухэлектродной (PP), мультиградиентной (MG), трехэлектродной (PD) и Веннера типов (WA, WB, WG).

1.2 Изучение глубинности и разрешающей способности малоглубинных частотных зондирований в двух и трехслойных одномерных моделях

С целью оценки зондирующей способности аппаратуры ЭМС были проведены следующие исследования. Для определенных геоэлектрических разрезов были рассчитаны синтетические сигналы, которые затем подвергались инверсии в предположении отсутствия априорной информации.

Проведено математическое моделирование на двухслойной и трехслойной средах для прибора малоглубинного частотного зондирования ЭМС. Были рассмотрены контрастные модели среды. Каждая модель включает 14 пикетов с шагом по профилю 1 м. Мощность верхнего слоя на каждом пикете увеличивается на 0,5 м. Ниже показана модель (рис. 2) с верхним слабо проводящим слоем (32 Ом*м) и нижним проводящим полупространством (1 Ом*м).

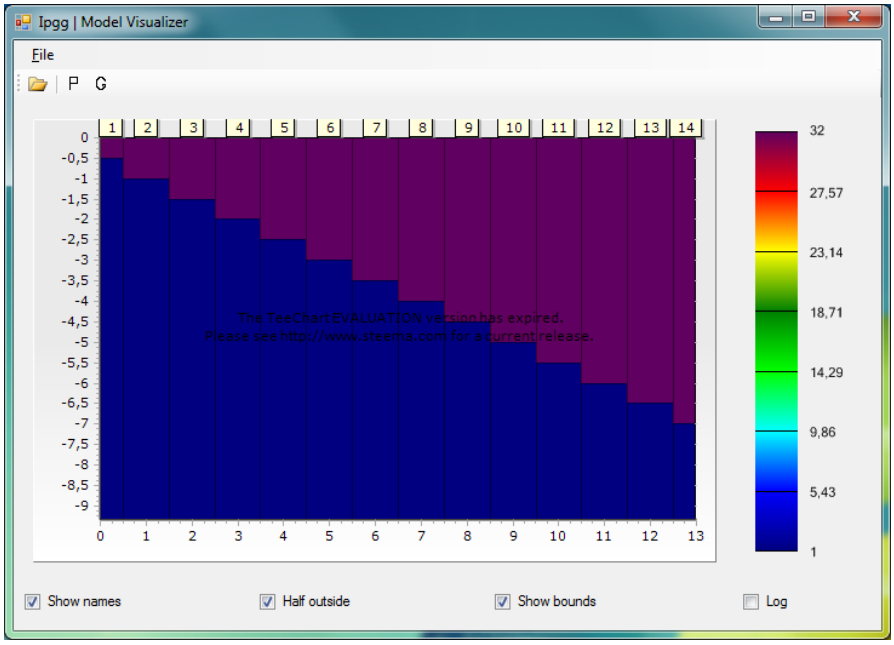


Рис. 2. Модель двухслойной среды «изолятор-проводник». Сверху слой изолятора (32 Ом*м) с увеличивающейся мощностью, снизу проводящее полупространство (1 Ом*м).

На следующем рисунке показана модель (рис. 3) с верхним более проводящим слоем (1 Ом*м) и нижним слабо проводящим полупространством (32 Ом*м).

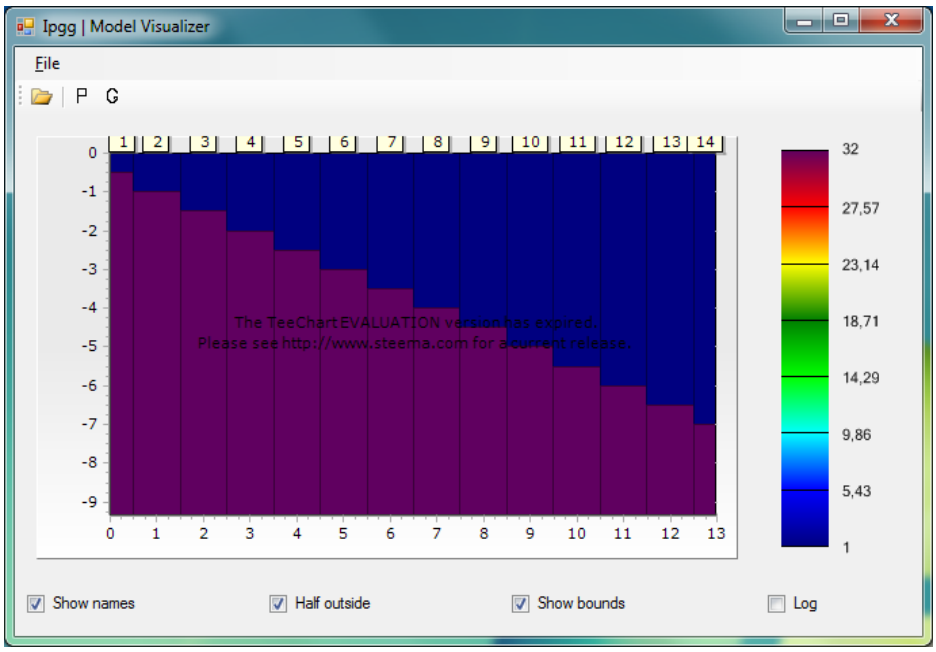


Рис. 3. Модель двухслойной среды «проводник-изолятор». Сверху проводящий слой (1 Ом*м) с увеличивающейся мощностью, снизу изолирующее полупространство (32 Ом*м).

Был рассчитан сигнал, получаемый прибором ЭМС, для каждой из этих моделей (см. раздел моделирования и трансформации МЧЗ). В программе расчета были заложены геометрические и частотные характеристики прибора.

Для получения результата использовались программы одномерной инверсии EMS (ИНГГ СО РАН) и Nemfis1D (автор Александр Каминский). После открытия файлов в программе инверсии на каждом пикете устанавливалось количество слоем заложенное в модели, если это было необходимо. Инверсия выполнялась в автоматическом режиме, без использования какой-либо априорной информации (никакие параметры модели не фиксировались).

Далее приведены результаты инверсии для каждой из моделей (рис. 4 и рис. 5).

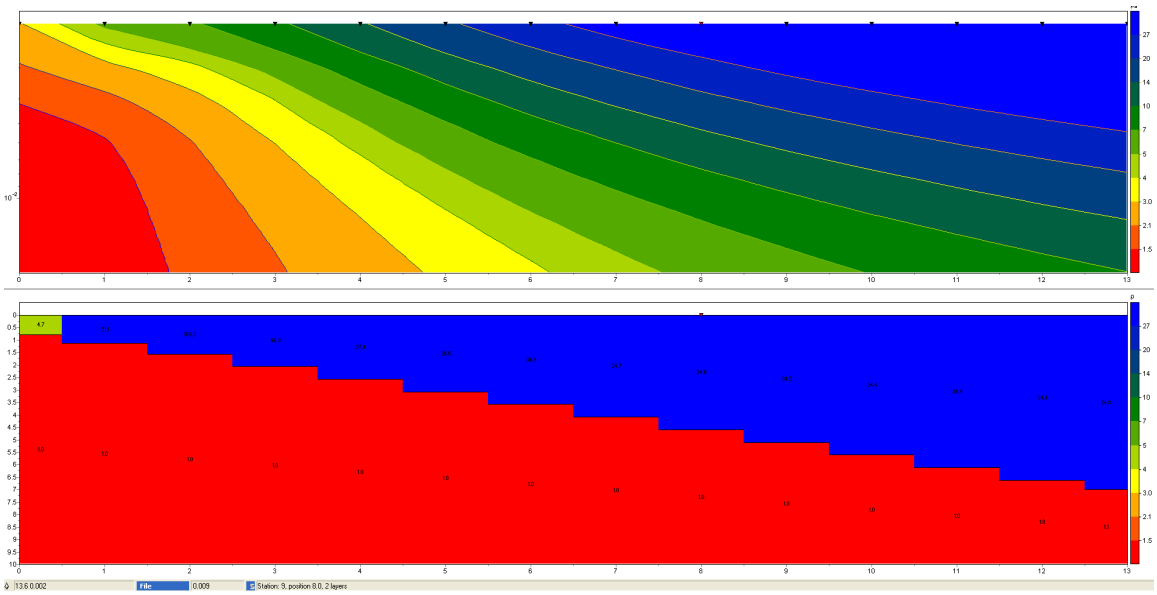


Рис. 4. Результат инверсии для модели двухслойной среды «изолятор-проводник». Сверху слой изолятора с увеличивающейся мощностью, снизу проводящее полупространство

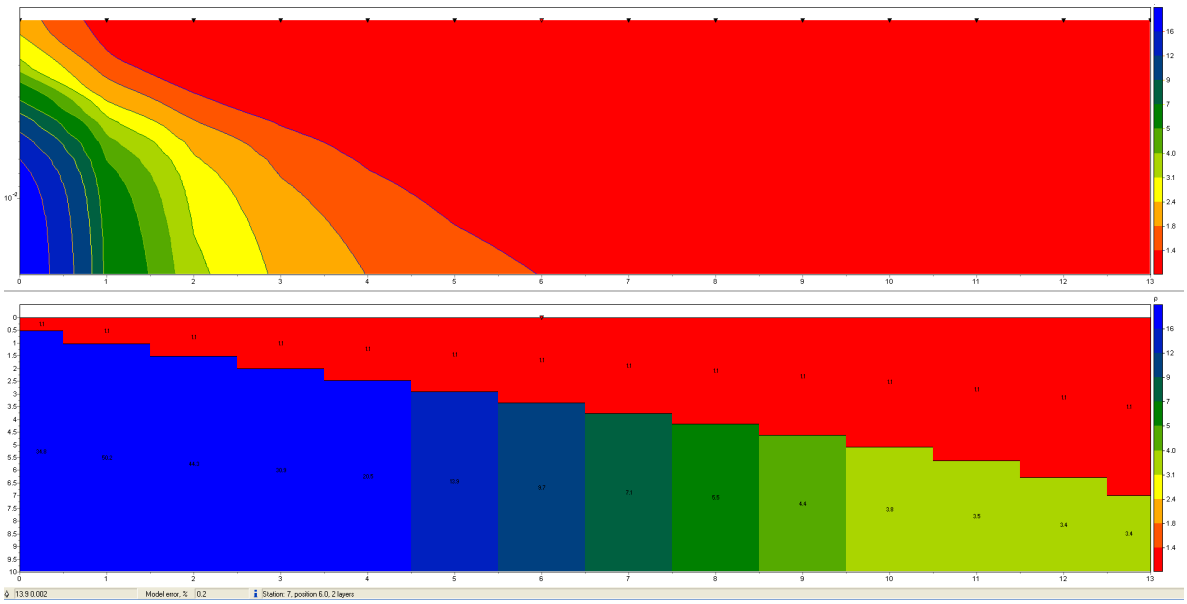


Рис. 5. Результат инверсии для модели двухслойной среды «проводник-изолятор». Сверху проводящий слой с увеличивающейся мощностью, снизу изолирующее полупространство

По приведенным результатам можно сделать вывод, что в случае модели среды «изолятор-проводник» инверсия позволяет восстановить исходную среду с большей точностью, чем в случае модели «проводник-изолятор». Если мощность в обеих моделях среды восстанавливается довольно корректно, то точность воспроизведения значения сопротивления нижнего слоя значительно падает с глубиной.

Для тех же моделей была проведена инверсия синтетического сигнала, в который была внесена погрешность до 5% с нормальным распределением (рис. 6 и рис. 7).

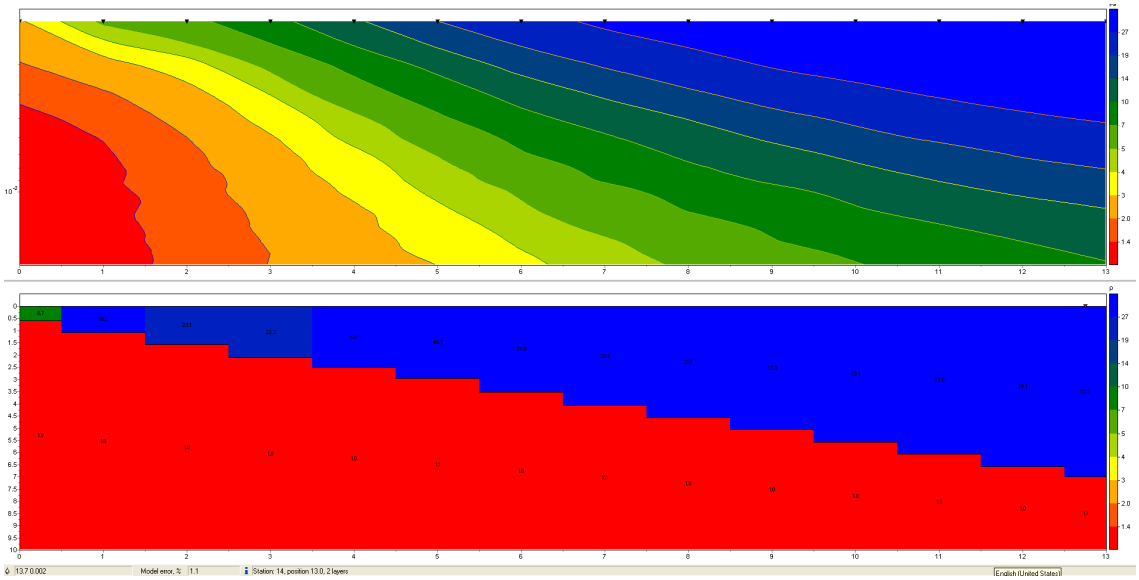


Рис. 6. Результат инверсии для модели двухслойной среды «изолятор-проводник» с внесенной в сигнал ошибкой

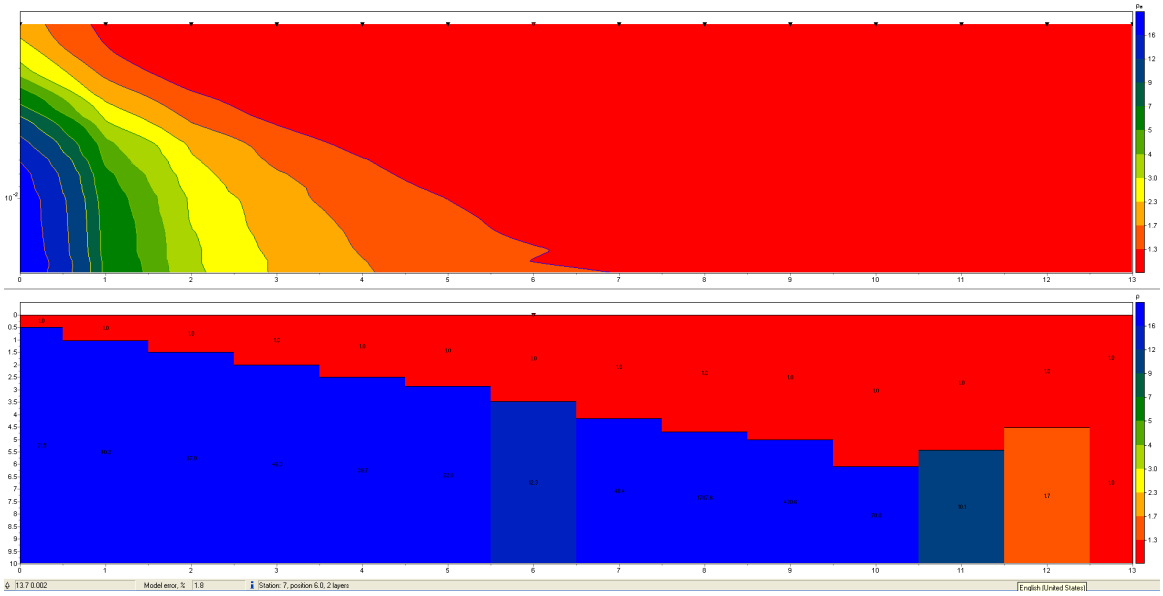


Рис. 7. Результат инверсии для модели двухслойной среды «проводник-изолятор» с внесенной в сигнал ошибкой

По данным результатам, как и в предыдущем случае можно сказать, что в случае модели среды «изолятор-проводник» инверсия выполняется с большей точностью, чем в случае модели «проводник-изолятор». Выводы, сделанные для инверсии «чистых» сигналов правомерны и для инверсии сигналов с погрешностью. Кроме этого добавляется

то, что после определенного заглубления изолирующего слоя, инвертированные значения глубины его кровли становятся некорректными.

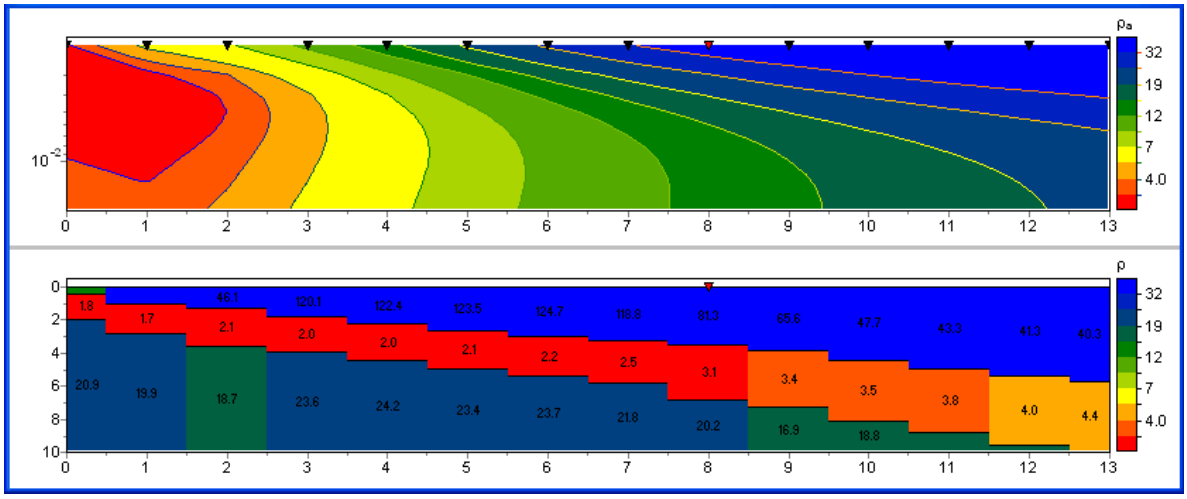


Рис. 8. Результат инверсии для модели трехслойной среды «изолятор-проводник-изолятор». Проводящий слой равномерно заглубляется в слабо проводящее полупространство

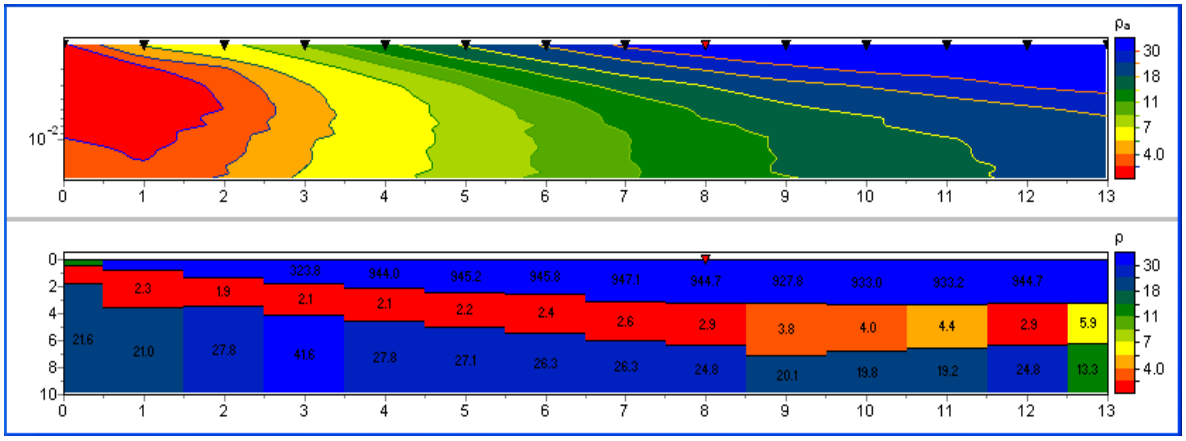


Рис. 9. Результат инверсии для модели трехслойной среды «изолятор-проводник-изолятор» с внесенной в сигнал погрешностью

Были проведены исследования для трехслойных моделей среды с проводящим слоем. Выше приведены результаты, полученные при инверсии синтетических данных для проводящего слоя, погружаемого в однородное слабо проводящее полупространство (рис 8 и рис. 9).

Инверсия идеальных данных восстанавливает мощность и сопротивление проводящей прослойки достаточно корректно, хотя и с ухудшением точности при заглублении слоя. Инверсия сигнала, содержащего погрешность, отчетливо демонстрирует тот факт, что без дополнительной априорной информации воспроизведение реальной модели осложнено высокой эквивалентностью по параметрам модели.

1.3 Многоэкстремальный сигнал от локальных приповерхностных объектов при электромагнитном профилировании компактным зондом с разнесенными катушками

В настоящее время методы электромагнитного зондирования и профилирования весьма популярны при решении малоглубинных задач, находя широкое применение в таких областях как экология, инженерная геофизика, археология и почвоведение. В последние десятилетия был разработан и успешно применяется ряд одночастотных и многочастотных электромагнитных приборов (среди них EM-31, EM-34, EM-38, производимые компанией Geonics; GEM-2, GEM-3, производимые Aeroquest; CMD – Explorer, производимая GF Instruments и т.д.). Упомянутые устройства могут быть использованы для поиска локальных проводящих объектов, например, таких как неразорвавшиеся боеприпасы или промышленные отходы. Часть аппаратуры предназначена для зондирования и профилирования, часть только для профилирования. Схема измерения бывает двух- или трехкатушечной, с компенсацией прямого поля. Катушки могут быть либо разнесенными, либо концентрическими. В малоглубинных реализациях первые имеют универсальное предназначение, вторые, как правило, используются только для поиска локальных неоднородностей удельного сопротивления грунта. В настоящей работе рассматриваются разнесенные системы.

Целью исследования является изучение сигнала двух и трехкатушечных реализаций электромагнитной аппаратуры, работающей в частотной области, над локальными проводящими аномалиями.

1.3.1 Математическое моделирование

В первую очередь рассмотрим двухкатушечный зонд. Катушки зонда и проводящий объект аппроксимированы вертикальными магнитными диполями. Выражения для расчета напряженности магнитного поля и э.д.с. в однородном проводящем пространстве приведены ниже:

$$H_z^t = -\frac{I_t M_t}{4\pi R^3}\left(\frac{3r^2}{R^2} + \frac{3kr^2}{R} + k^2 r^2 - 2 - 2kR\right)e^{-kR},$$

где $k^2 = i\omega\mu_0\sigma$, r и R – цилиндрический и сферический радиусы, I_t и M_t – ток и момент генераторной катушки, σ - электропроводность среды.

$$\varepsilon_d = i\omega\mu_0 M_d H_z(r_d), \quad I_d = \varepsilon_d / Z_d,$$

где I_d, M_d, r_d, ε_d, Z_d – ток, момент, положение, э.д.с., полное сопротивление объекта.

Генераторная катушка индуцирует э.д.с. в локальном объекте. Затем вычисляется ток, индуцированный в этом кольце и далее, используя его уже в качестве источника, рассчитывается вторичная э.д.с. в приемной катушке (точечный приемник – диполь). Результаты моделирования приведены ниже (рис. 10).

Моделирование выполнено для устройства имеющего пять разносов и пять рабочих частот (см. рис. 10). Таким образом, осуществляемое зондирование является комбинацией частотного и геометрического способа (схема аналогичная в CDM explorer, только с фиксированной генераторной катушкой). Профильные диаграммы имеют несколько экстремумов (рис. 10). При глубинах, не превышающих 1 м, большинство диаграмм имеют два экстремума, соответствующих проводящему объекту. При наличии нескольких подобных объектов диаграммы сигнала довольно сложны для корректной интерпретации. При погружении проводника на глубину до 2 м на профильных кривых остается один преобладающий максимум.

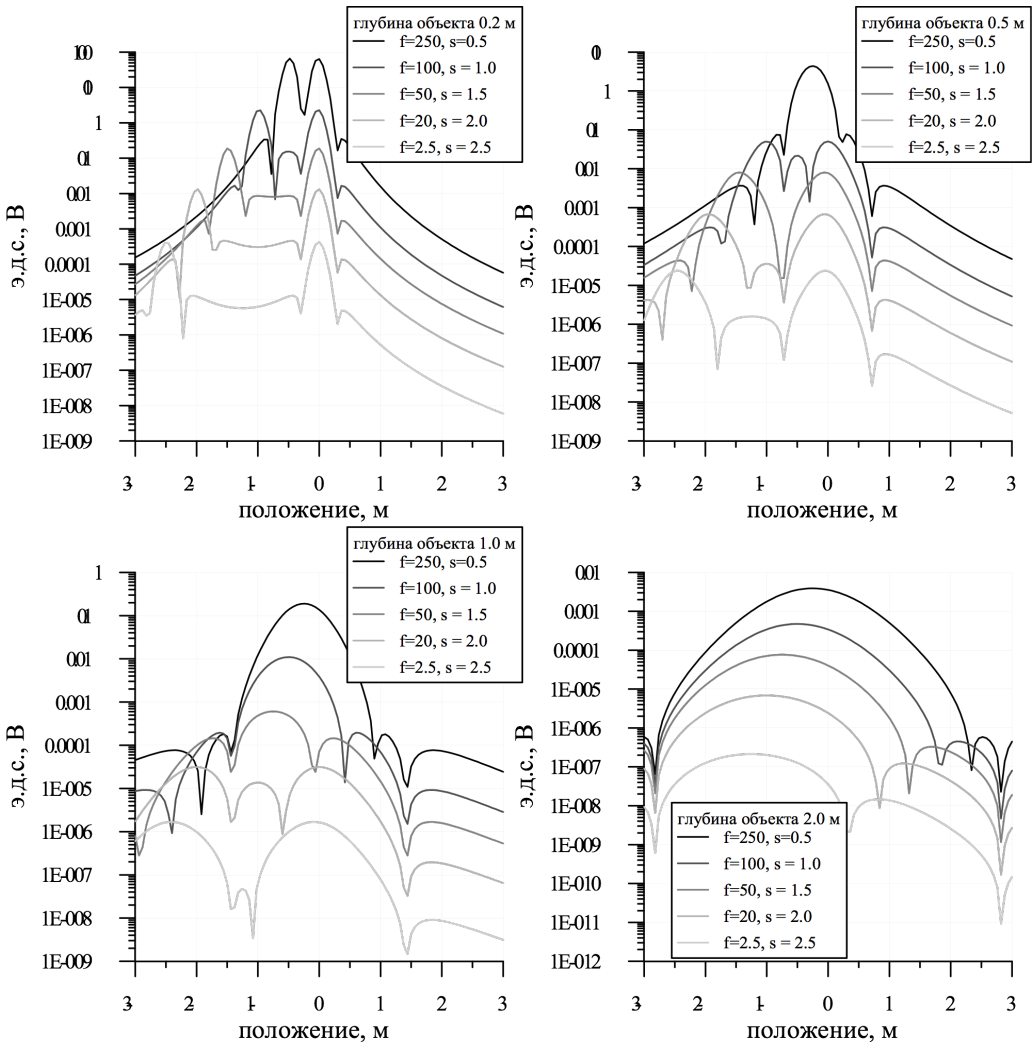


Рис. 10. Синтетический сигнал двухкатушечного зонда, в котором используются пять частот (2.5-250 кГц) и пять разносов (0.5–2.5 м), над локальным проводящим объектом, расположенном на нескольких глубинах (0.2, 0.5, 1.0, 2.0 м)

Было выполнено моделирование для трехкатушечного зонда с фиксированными катушками (аппаратура ЭМС) [Балков, 2001]. Аппаратура по своему принципу аналогична прибору GEM2 за исключением увеличенного разноса (1.5 и 2.5 м) и частотного диапазона (от 2.5 кГц до 250 кГц). Сигнал был рассчитан по формулам, приведенным выше, примененным к случаю включенных на разность двух приемных катушек (диполей).

На рис. 11 приведен сигнал, рассчитанный вдоль профиля длиной 6 м на одной частоте. Видно, что сигнал над объектом расположенным на малой глубине имеет три образа, далее при погружении объекта начинают преобладать два, и на глубине более 1 м остается один образ. Последний имеет экстремум на расстоянии около 1.4 м от генератора и это расстояние может быть использовано для определения точки записи аппаратуры.

Далее выполнено моделирование сигнала для площади 2 на 6 м^2 (рис 11) при изменении глубины мишени от 0.1 до 2 м. На рис. 13 представлены результаты в

построении 3D, которые демонстрируют форму сигнала, индуцированного локальным проводником. Изображение наглядно демонстрируют наличие нескольких образов от одного объекта, при расположении последнего на малых глубинах и их вырождение в один преобладающий максимум сигнала при заглублении проводника.

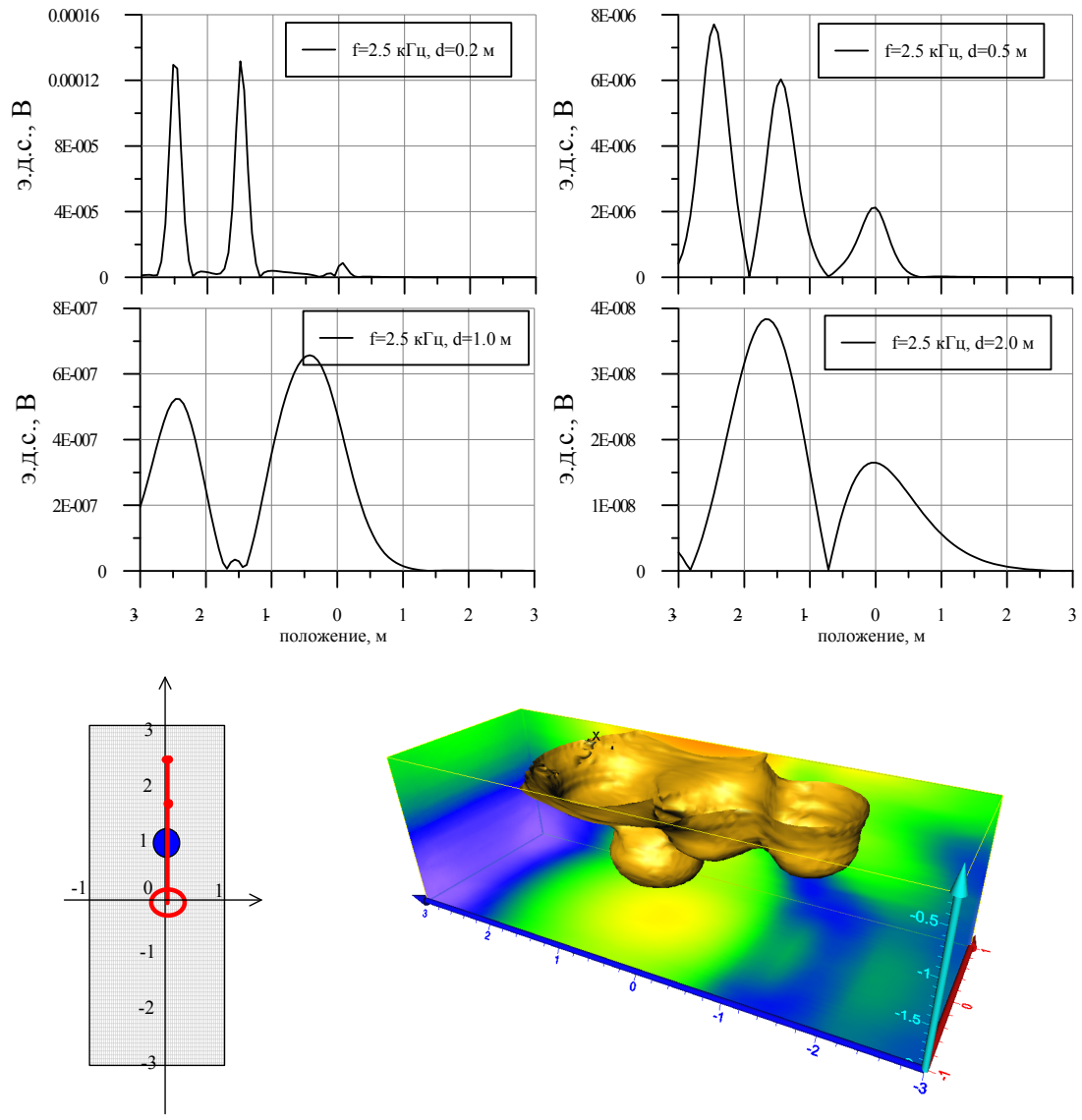


Рис. 11. Синтетический сигнал трехкатушечного зонда на частоте 2.5кГц над локальным проводящим объектом, расположенном на нескольких глубинах (0.2, 0.5, 1.0, 2.0 м) (вверху).
Синтетическое площадное профилирование (2 на 6 м^2) над локальным проводящим объектом при изменении его глубины от 0.1 до 2 м (внизу)

Специальная часть моделирования была выполнена для двухкатушечного зонда, приемники которого расположены вдоль прямой, проходящей под углом к плоскости генератора (рис. 12). Остальные параметры катушек аналогичны параметрам зонда аппаратуры ЭМС. Такая конфигурация уменьшает сигнал от объекта, когда приемник находится над ним, поэтому все диаграммы имеют только один выраженный максимум сигнала над локальным проводником (рис. 13). Это делает текущую конфигурацию

наиболее выгодной среди рассмотренных для обнаружения локальных неоднородностей, расположенных на небольших глубинах.

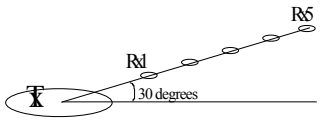


Рис. 12. Схема антенн

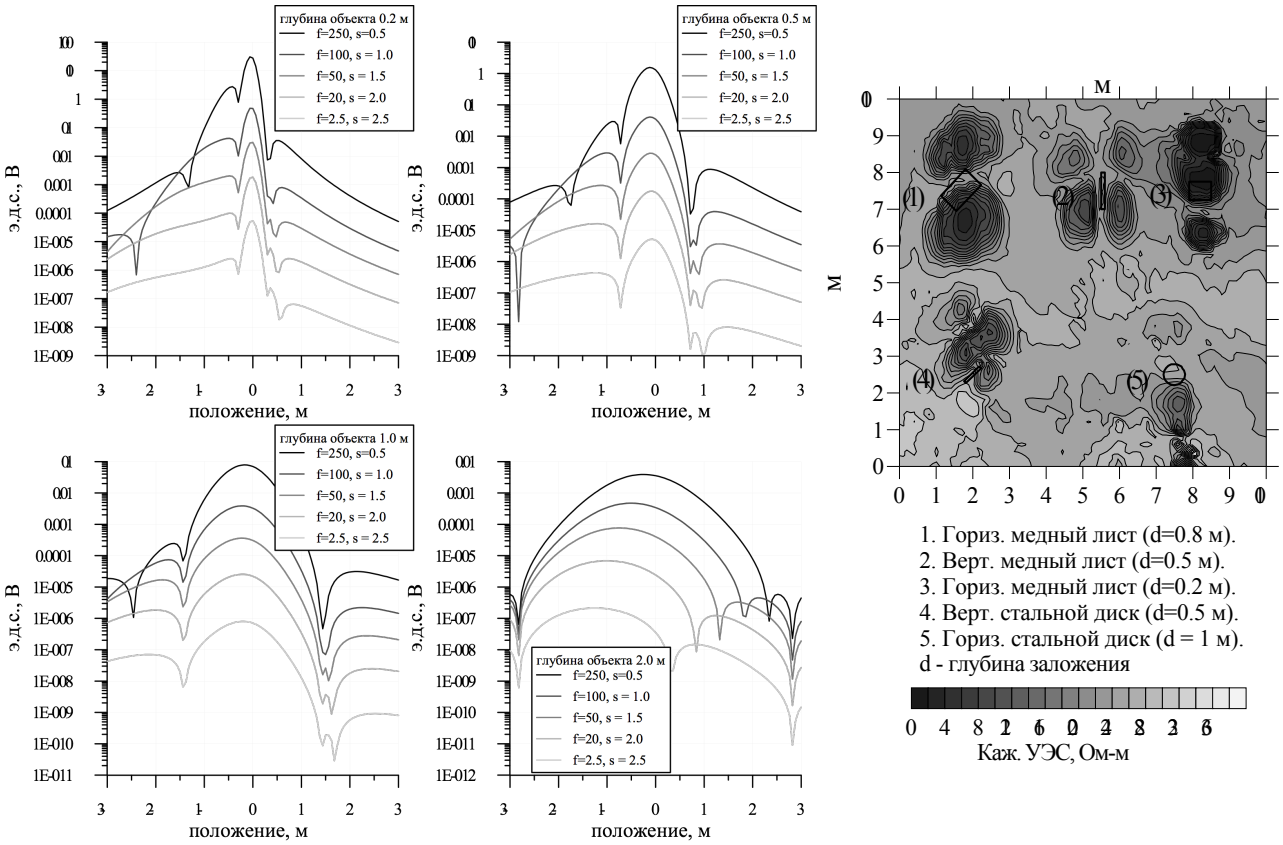


Рис. 13. Синтетический сигнал двухкатушечного зонда, катушки которого расположены вдоль прямой проходящей под углом к плоскости генератора. Используются пять частот (2.5-250 кГц) и пять разносов (0.5–2.5 м), над локальным проводящим объектом, расположенном на нескольких глубинах (0.2, 0.5, 1.0, 2.0 м) (слева).
Результаты электромагнитного профилирования трехкатушечным зондом (аппаратура ЭМС, 2.5 кГц). Распределение кажущегося УЭС над металлическими мишенями (справа)

1.3.2 Пример полевых данных

Аппаратура ЭМС была применена на электрометрическом полигоне Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Результат профилирования на частоте 2.5 кГц показан на рис. 13. На исследованном участке на различной глубине заложены пять мишеней с различной пространственной ориентацией. Все мишени находятся на глубине не более 1 м, поэтому обуславливают несколько образов в сигнале. Мишени, ориентированные горизонтально, создают два или три образа, что вполне согласуется с результатами математического моделирования. Вертикально ориентированные мишени создают более сложные аномалии, напоминающие по своей форме квадруполи. Таким образом, при интерпретации такого рода полевых данных необходимо привлекать результаты математического и физического моделирований.

Теоретические и практические изыскания показывают, что аномальные локальные объекты создают достаточно сложный сигнал для компактных электромагнитных зондов, применяемых в настоящее время в мировой практике. Сигнал содержит от одного до четырех образов от одного аномального объекта. Предложенная новая конфигурация приемных катушек, расположенных вдоль прямой, проходящей под углом к плоскости генератора, обеспечивает единственную преобладающую аномалию сигнала над объектом.

2 ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНЫЙ ПОЛИГОН

2.1 Экспериментальные исследования. Комплексные полевые испытания, апробация комплексной методики обработки и интерпретации данных малоглубинных частотных зондирований и электротомографии

Для отработки методики работ методами электротомографии и малоглубинного частотного зондирования, испытания новых аппаратурных разработок ИНГГ СО РАН (электроразведочная станция «Скала-48», реализующая метод ЭТМ, и электромагнитный сканер ЭМС, реализующий метод МЧЗ), на территории обсерватории «Ключи», принадлежащей ИНГГ СО РАН, начиная с 2010 года, развивается электрометрический

полигон. В настоящем разделе приведены описание устройства полигона и результаты исследований, проведенных за период 2010 – начало 2011 г.

2.1.1 Мировая практика создания электроразведочных полигонов

Перед созданием полигона и заложения на нем мишеней был проведен анализ данных о существовании подобных полигонов. Были изучены данные о нескольких полигонах. Один из них **Stanford University Environmental Test Site** расположен на территории Стенфордского университета, второй **Geophex's UXO Test Site** в США на территории штата Северная Каролина, а также **EIGG Test Site** в Великобритании на территории Лестерского университета. В целом все эти полигоны схожи по принципу их организации. Общая площадь полигонов разделена на отдельные участки, на которых заложены мишени. Полигоны создавались совместно геофизическими компаниями и университетами. Первым это необходимо для испытаний своей аппаратуры, а вторым для проведения учебных геофизических практик для студентов.

Исследования на полигоне **Stanford University Environmental Test Site** проводились аппаратурой EM61 [Bosmar M., 2001]. Система EM61 представляет собой металлодетектор большой мощности, обладающий высокой чувствительностью, предназначенный для обнаружения и дифференциации черных и цветных металлов. Система, в основе конструкции которой лежит принцип электроразведки методом переходных процессов, включает в себя одну возбуждающую катушку и две приемные катушки. Первичное магнитное поле, создаваемое излучающей катушкой, наводит вихревые токи в находящихся неподалеку металлических объектах. Наведенные вихревые токи затухают со временем, скорость этого затухания зависит от характеристик объекта. Ниже (рис. 14) показан план данного полигона, и карта кажущейся проводимости, полученная по данным исследований. На карте проводимости выделяются все металлические объекты и некоторые выполненные не из металла. Положение аномалий четко совпадает с положением мишеней.

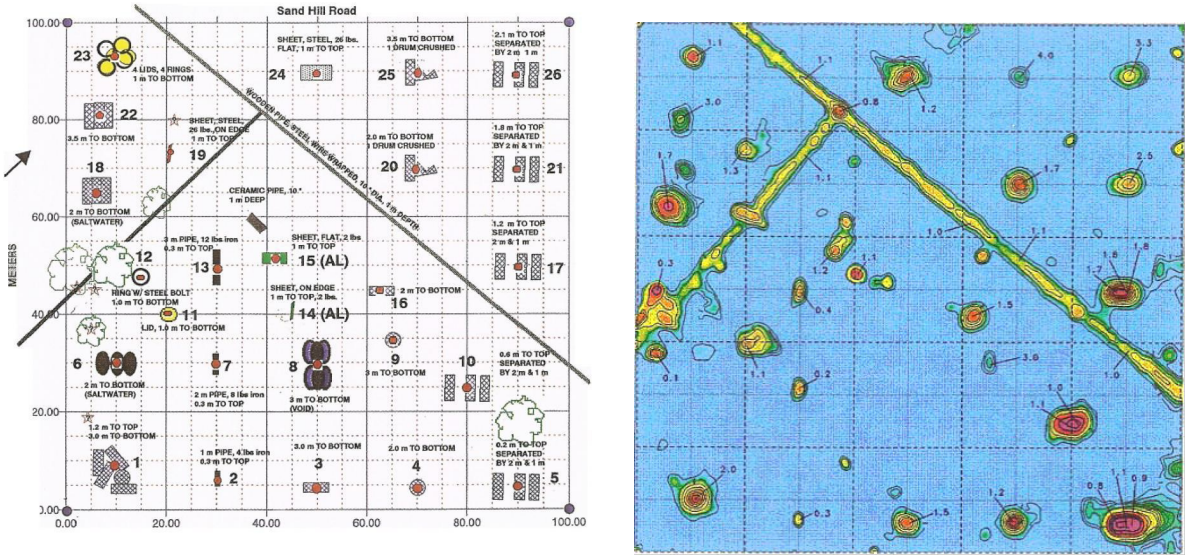
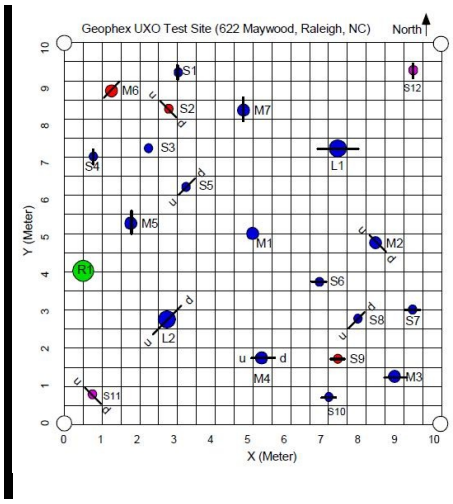


Рис. 14. Слева показан план полигона Stanford University Environmental Test Site на территории Стенфордского университета, справа карта распределения кажущейся проводимости полигона



Target ID	Description	x (m)	y (m)	z (cm)
L1	6.1"-OD x 20" steel pipe, horizontal, E-W	7.25	7.25	100
L2	6.1"-OD x 20" steel pipe, 45 deg; SW(up)-NE	2.75	2.75	110
M1	3.1"-OD x 18" steel pipe, vertical	5.00	5.00	70
M2	3.1"-OD x 18" steel pipe, 45 deg, NW(up)-SE	8.25	4.75	80
M3	2.5"-OD x 12" steel pipe, horizontal E-W	8.75	1.25	50
M4	2.5"-OD x 12" steel pipe, 45 deg, W(up)-E	5.25	1.75	60
M5	3.1"-OD x 18" steel pipe, horizontal, N-S	1.75	5.25	70
M6	2.5"-OD x 12" aluminum pipe, horizontal SW-NE	1.25	8.75	50
M7	2.5"-OD x 12" steel pipe, horizontal N-S	4.75	8.25	60
S1	0.8"-OD x 4" steel pipe, horizontal N-S	3.00	9.25	10
S2	0.9"-OD x 6" aluminum pipe, 45 deg, NW(up)-SE	2.75	8.25	15
S3	1.6"-OD x 6" steel pipe, vertical	2.25	7.25	30
S4	1.6"-OD x 4" steel pipe, horizontal N-S	0.75	7.00	30
S5	1.6"-OD x 6" steel pipe, 45 deg, SW(up)-NE	3.25	6.25	30
S6	1.6"-OD x 6" steel pipe, horizontal E-W	6.75	3.75	30
S7	1.6"-OD x 4" steel pipe, horizontal E-W	9.25	3.00	30
S8	1.6"-OD x 6" steel pipe, 45 deg, SW(up)-NE	7.75	2.75	20
S9	0.9"-OD x 6" aluminum pipe, horizontal E-W	7.25	1.75	15
S10	0.8"-OD x 4" steel pipe, horizontal E-W	7.00	0.75	10
S11	0.9"-OD x 6" copper pipe, 45 deg, NW(up)-SE	0.75	0.75	20
S12	0.9"-OD x 6" copper pipe, horizontal N-S	9.25	9.25	15
R1	30x30(top)x33cm (deep) diabase boulder; top at 15cm	0.50	4.00	27

Рис. 15. План полигона Geophex's UXO Test Site в США на территории штата Северная Каролина

На полигоне **Geophex's UXO Test Site** в США исследования проводились аппаратурой GEM3 [Won J., et al., 1997]. Это устройство представляет собой широкополосный (диапазон частот 30 Гц-96 кГц) электромагнитный сканер, состоящий из двух генераторных и одной приемной катушки. Компенсация прямого поля осуществляется за счет введения дополнительного генераторный контура вблизи измерителя, поэтому в точке приема не существует поля генератора в воздухе. Данная аппаратура хорошо подходит для поиска закопанных металлических объектов, таких как трубы, неразорвавшиеся боеприпасы и др. На рис. 15 показан план полигона **Geophex's UXO Test Site.** Карты аномалий, полученные аппаратурой GEM3, представлены на рис. 16.

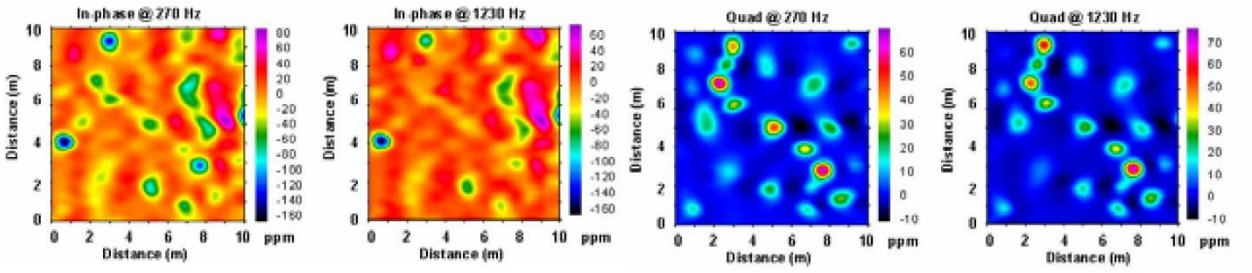


Рис. 16. Карты аномалий, полученные прибором GEM3, на территории полигона Geophex's UXO Test Site

Рис. 17. Примеры мишеней на полигоне EIGG Test Site. Слева большой булыжник, имитирующий контейнер с отходами; справа бетонные блоки, погруженные в песок

С учетом структуры данных полигонов был разработан план создания электроразведочного полигона на территории обсерватории «Ключи» (ИНГГ СО РАН). При создании полигона учитывалась возможность проведения исследований малоглубинными методами, такими как МЧЗ, электротомография и, возможно, методами подповерхностной георадиолокации, сейсмики и гравиразведки. Целью создания полигона является изучение разрешающей способности аппаратуры, а также отработка методики проведения исследований. Также его можно использовать для калибровки аппаратуры и демонстрационных работ. На полигоне закладывались мишени из разных материалов и разной формы, имеющие практическую значимость для полевых исследований. В частности в качестве мишеней были заложены пластиковые и металлические трубы разной длины и диаметра, алюминиевые фляги, пластиковые канистры и др.

Полигон в Ключах имеет два участка, каждый из которых состоит из шести и четырех квадратов соответственно, площадь одного квадрата составляем 100 м^2 (10*10 м). Верхний слой территории полигона представлен почвой мощностью до 1 м. Под почвой находится водонасыщенный слой глины. В траншеи, выкопанные для мишеней, на глубине около двух метров просачивалась грунтовая вода.

2.1.2 Разработка конфигурации мишеней и обустройство электроразведочного полигона

На территории стационара были выполнены предварительные исследования аппаратурой ЭМС, чтобы определить положение коммуникаций (труб и кабелей), проложенных на данной территории и определить местоположение площадок пригодных для закладывания мишеней (рис. 19, рис. 20).

По полученным данным, были построены карта логарифма распределения удельной проводимости на исследованной территории на частоте 5,102 кГц, шаг сети измерений в обоих направлениях составлял 1м. Исходя из данных, отображенных на построенных картах, территория полигона была разделена на два участка (см. рисунки ниже).

Для организации мишеней было задействовано 10 квадратов по 100 м^2, на которых было заложено 33 мишени, имитирующих различные реальные объекты. На фотографиях показан процесс заложения одной из мишеней – водопроводной трубы диаметром 100 мм на глубину 1 м (рис. 18).

Рис. 18. Работы на полигоне по укладке геофизических мишеней

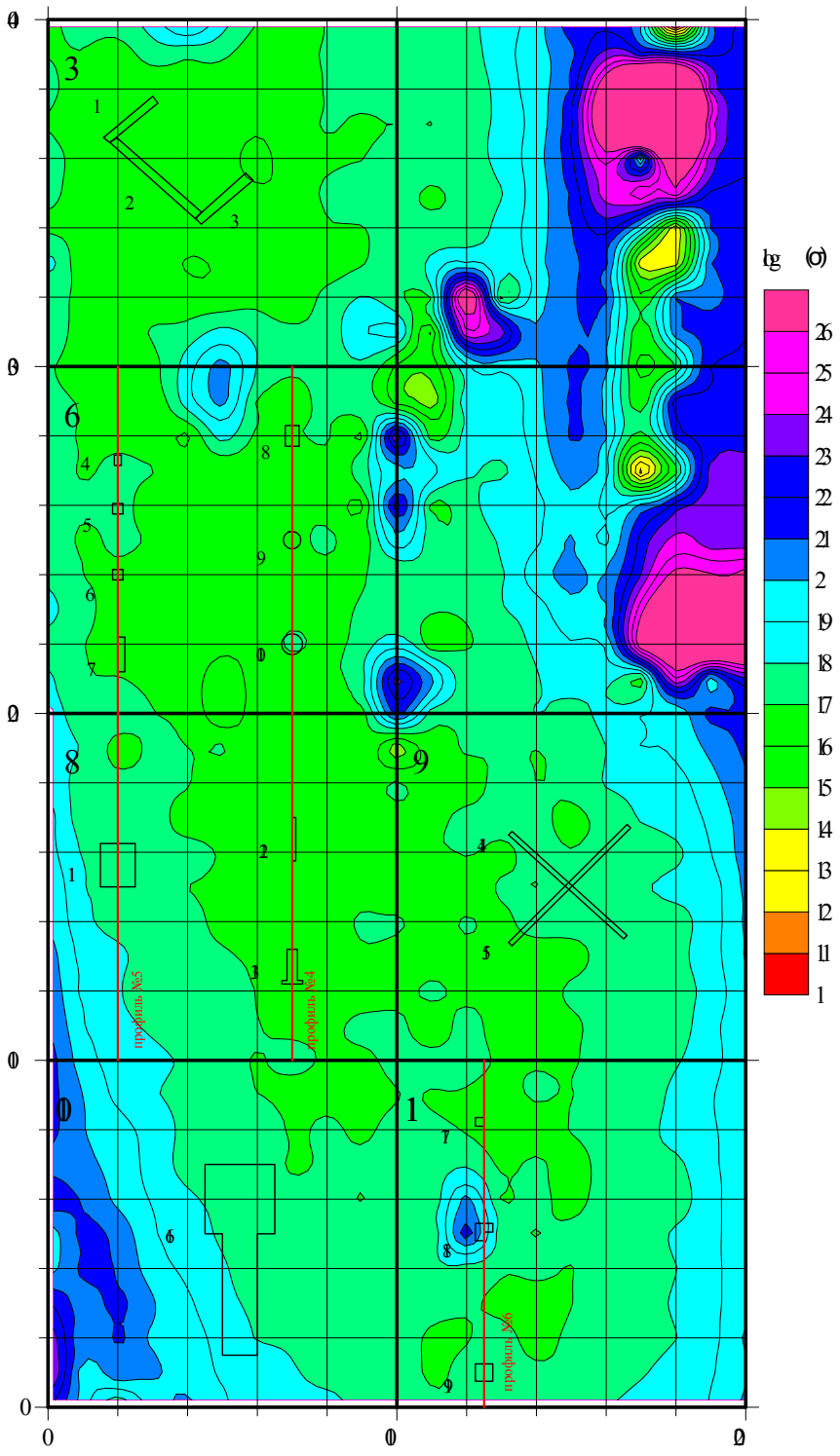


Рис. 19. Карта логарифма распределения удельной проводимости на Участке №1

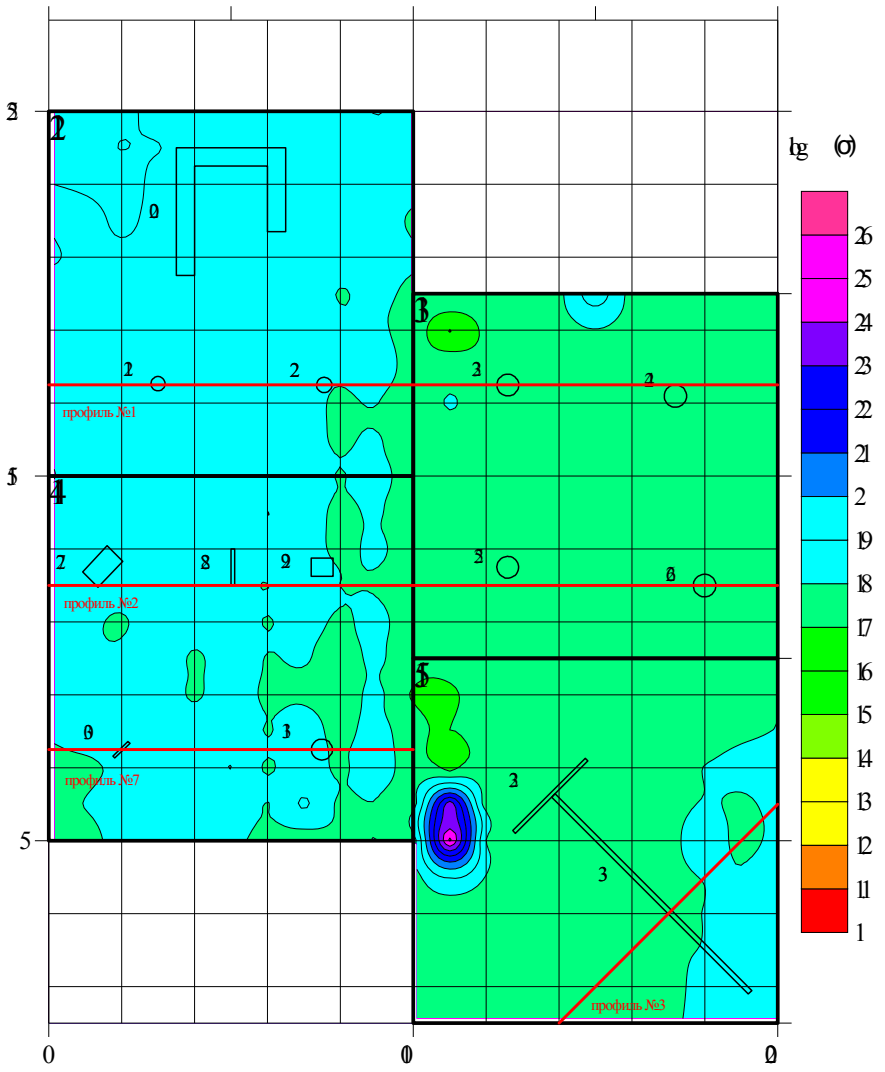


Рис. 20. Карта логарифма распределения удельной проводимости на Участке №2

На схемах (рис 19 и рис. 20) приведено расположение всех заложенных объектов (мишеней). На рисунках крупными цифрами отмечены номера квадратов, контурами обозначено положение мишеней, мелкими цифрами отмечен их порядковый номер. Описание мишеней и их расположение по глубине описаны ниже в таблице (таб. 1).

В процессе выполнения опытно-методических работ были выбраны опорные профили (на рис. 19 и рис. 20, выделены красными линиями), вдоль которых проводились повторные измерения различными комплектами аппаратуры ЭМС.

№ квадрата	*№ мишени*	*Описание мишени*
03	**1**	Пластиковая труба длиной 1,8 м, D 110 мм. Глубина заложения 0,5 м.
03	**2**	Пластиковая труба длиной 3,7 м, D 60 мм. Глубина заложения 0,5 м.
03	**3**	Закопанная траншея без мишени. Глубина траншеи 0,5м.
06	**4**	Пластиковая бутылка 1 шт. (5л) с мет. стружкой. Глубина заложения 0,5 м.
06	**5**	Пластиковые бутылка 3 шт. (5 л) с мет. стружкой. Глубина заложения 0,8 м.
06	**6**	Обрезки мет. труб (D 100 мм). Размер мишени 30*30 см. Глубина заложения 1,1 м.
06	**7**	«Зенитные снаряды». Обрезки круглого мет. бруса длиной 1,1 и 0,7 м, Dом 7 см. Лежат рядом, параллельно друг другу. Глубина заложения 1,5 м.
06	**8**	Алюминиевый лист 60*40 см. Глубина заложения 0,5 м.
06	**9**	Медный круг, D 0,5 м. Глубина заложения 0,5 м.
06	**10**	Железный круг, D 0,6 м. Глубина заложения 0,5 м.
08	**11**	Горизонтальный железный лист 1*1,25 м. Глубина заложения 2 м.
08	**12**	Вертикальный железный лист 1*1,25 м. Верхний край на глубине 1 м.
08	**13**	«Авиационная бомба». Железная конструкция из трубы длиной 0,85 м, Dом 0,3 м и приваренной к ней подставке 0,55-0,65 м. Н подставки 0,1 м. Глубина заложения 2 м.
09	**14**	Железная труба длиной 4 м (из л.в. угла в п.н. угол), Dом 100 мм. Глубина заложения 1 м.
09	**15**	Железная труба длиной 5 м (из л.н. угла в п.в. угол), Dом 100 мм. Глубина заложения 2 м.
10	**16**	Землянка (комната 2*2 м, коридор 1*3м) крыша на глубине 1 м, глубина землянки 1,5 м.
11	**17**	Пластиковая канистра (1 шт) (35*25*20 см). Глубина заложения 0,5 м.
11	**18**	Пластиковые канистры (3 шт) (35*25*20 см). Глубина заложения 1 м.
11	**19**	Пластиковые канистры (4 шт) (35*25*20 см). Глубина заложения 1,5 м.
12	**20**	Кирпичная стена. Ширина стены 0,5 м, Н 1 м. Выполнена в виде буквы «П». Перекладина длиной 3 м, левая нога 3,5 м, правая нога 2,3 м. Верхняя грань на глубине 0,5 м.
12	**21**	Алюмин. фляга (левая). D дна 0,35 м, Н 0,5 м. Глубина до крышки 0,5 м.
12	**22**	Алюмин. фляга (правая). D дна 0,35 м, Н 0,5 м. Глубина до крышки 2 м.
13	**23**	Железная бочка (л.в.). D 0,56 м, Н 0,9 м. Глубина до верхней грани 0,9 м.
13	**24**	Железная бочка (п.в.). D 0,56 м, Н 0,9 м. Глубина до верхней грани 2,5 м.
13	**25**	Железная бочка (л.н.). D 0,56 м, Н 0,9 м. Глубина до верхней грани 1,3 м.

13	**26**	Железная бочка (п.н.). D 0,56 м, H 0,9 м. Глубина до верхней грани 1,8 м.
14	**27**	Гор/ медный лист 1*0,6 м под углом к осям. Глубина заложения 0,8 м.
14	**28**	Вертикальный медный лист 1*0,6 м. Глубина до верхней грани 0,45 м (лежит на стороне 1 м).
14	**29**	Горизонтальный медный лист 0,5*0,6 м.. Глубина заложения 0,2 м.
14	**30**	Верт. железный круг Dом 0,6 м. Глубина до верхней грани 0,5 м.
14	**31**	Горизонтальный железный круг Dом 0,6 м. Глубина заложения 1 м.
15	**32**	Железная труба длиной 3 м, Dом 42 мм. Глубина заложения 0,65 м.
15	**33**	Железный брусок длиной 7,5 м. Сечение 20*30 мм. Глубина заложения 0,7 м.

Описание объектов (мишеней), заложенных на полигоне Таблица 1

2.2 Экспериментальные исследования. Результаты работ по сбору комплексных геофизических данных на электроразведочном полигоне и их интерпретация

В процессе опытно-методических работ и обработки результатов на текущем этапе выделились три блока. Первый блок включает в себя профиль № 1 и квадраты №№ 12 и 13, второй - профиль № 2 и квадраты №№ 13 и 14, третий – профили №№ 4 и 5 и квадрат № 6. Изложение результатов, входящих в обозначенные блоки, представлено соответствующим образом.

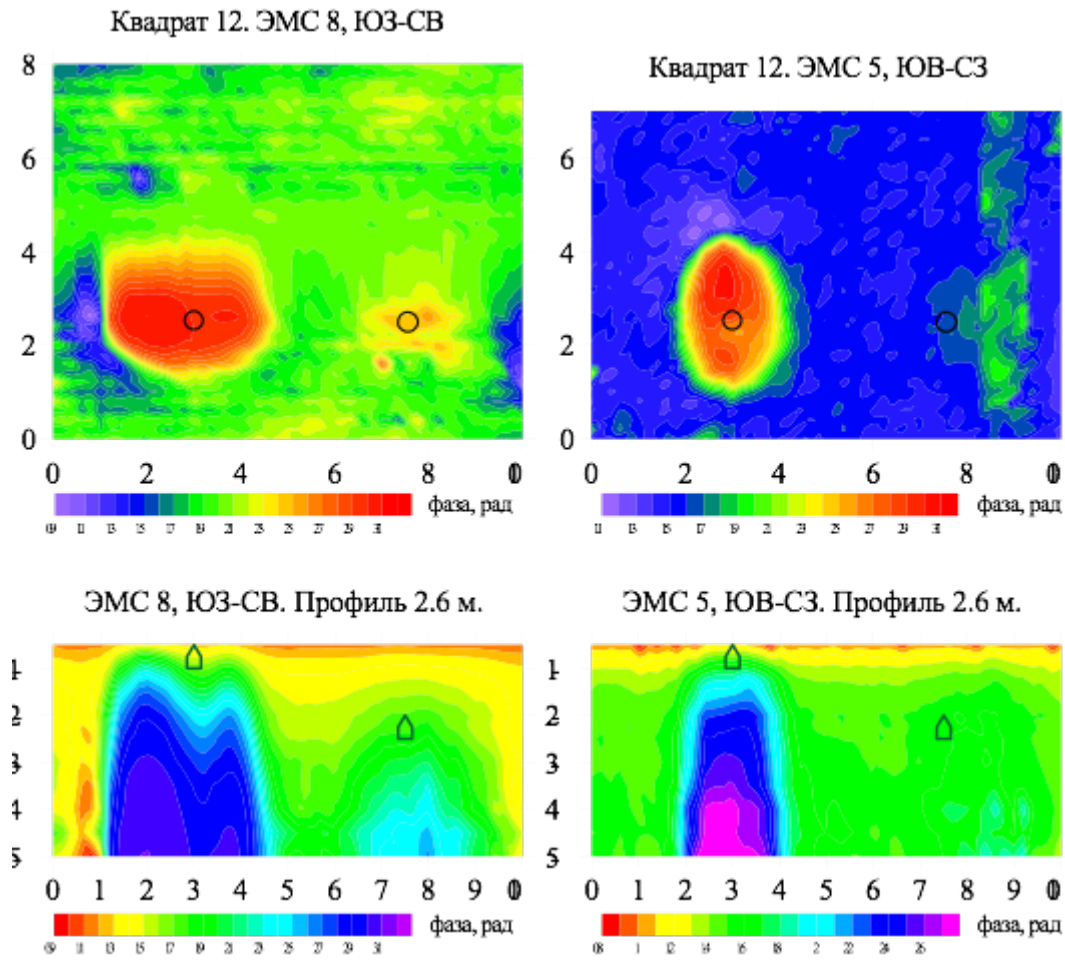


Рис. 21. Результаты площадных зондирований квадрата № 12. Частота на картах 2.5 кГц

Остальные результаты не сгруппированы в блоки и распределены независимо по номерам квадратов и профилей.

3.2.1 Результаты работ по Блоку №1 (Профиль №1, Квадраты №№ 12 и 13).

К настоящему моменту на участке блока №1 были выполнены следующие работы:

- съемка квадрата №12 с помощью ЭМС №8 в направлении ЮЗ-СВ,
- съемка квадрата №12 с помощью ЭМС №5 в направлении ЮВ-СЗ,
- съемка квадрата №13 с помощью ЭМС №27 в направлении ЮЗ-СВ
- зондирования вдоль профиля №1 с помощью ЭМС №№ 26, 27, 29.

В результате анализа карт и разрезов с различными компонентами и трансформациями сигнала было установлено, что фаза разностного сигнала, измеряемого аппаратурой ЭМС, является достаточно эффективной величиной для отображения аномалий.

Выше (рис. 21) были приведены карты и разрезы распределения фазы по одной и той же площади, пройденной во взаимно ортогональных направлениях. Была выбрана частота, на которой получены наиболее отчетливые результаты. Имеется явное «преимущество» карты, построенной по данным ЭМС №8 (ЮЗ-СВ). Выделяются обе мишени (алюминиевые фляги). Следует отметить, что четкое выделение замкнутой аномалии над боле глубокой алюминиевой флягой наблюдается только при просмотре результатов в фазе сигнала на низких частотах. На разрезах, построенных по данным комплекта аппаратуры ЭМС №8 аномалии лучше выражены, чем по данным аппаратуры ЭМС № 5.

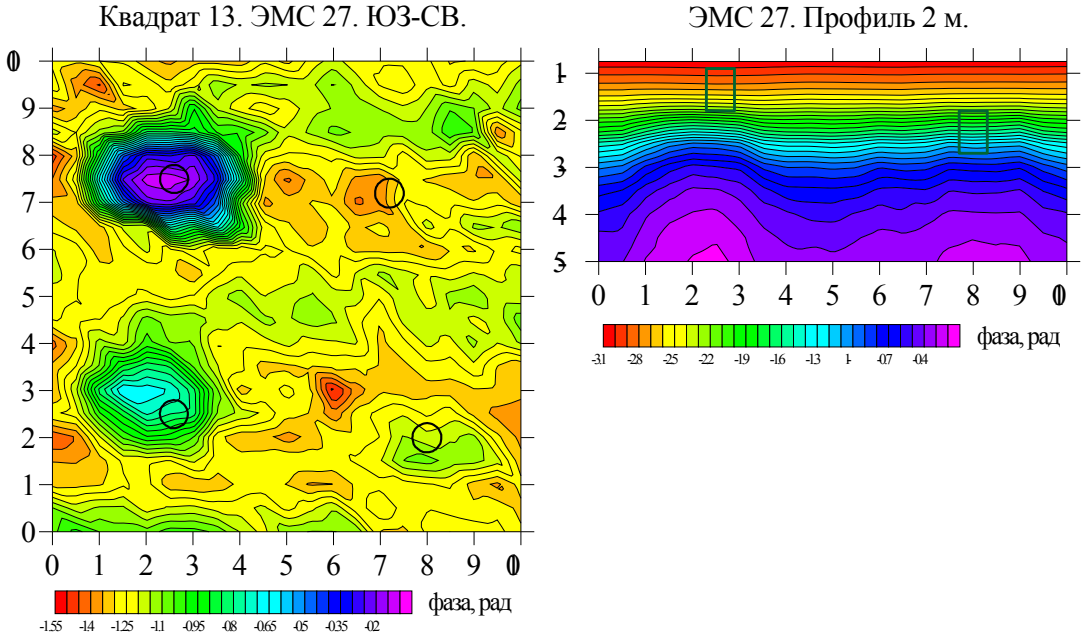


Рис. 22. Результаты площадных зондирований квадрата № 13. Частота на карте 2.5 кГц (левая часть рисунка)

На карте и разрезе 13-го квадрата (рис. 22) выделяются три мишени (металлические бочки) по величине фазы разностного сигнала. Наиболее глубокая бочка (2.5 м от поверхности до верхней части бочки) не выделяется ни в одном из представленных измерений.

В качестве демонстрации результатов, полученных по профилю №1, ниже показаны диаграммы (рис. 23) и разрезы (рис 24).

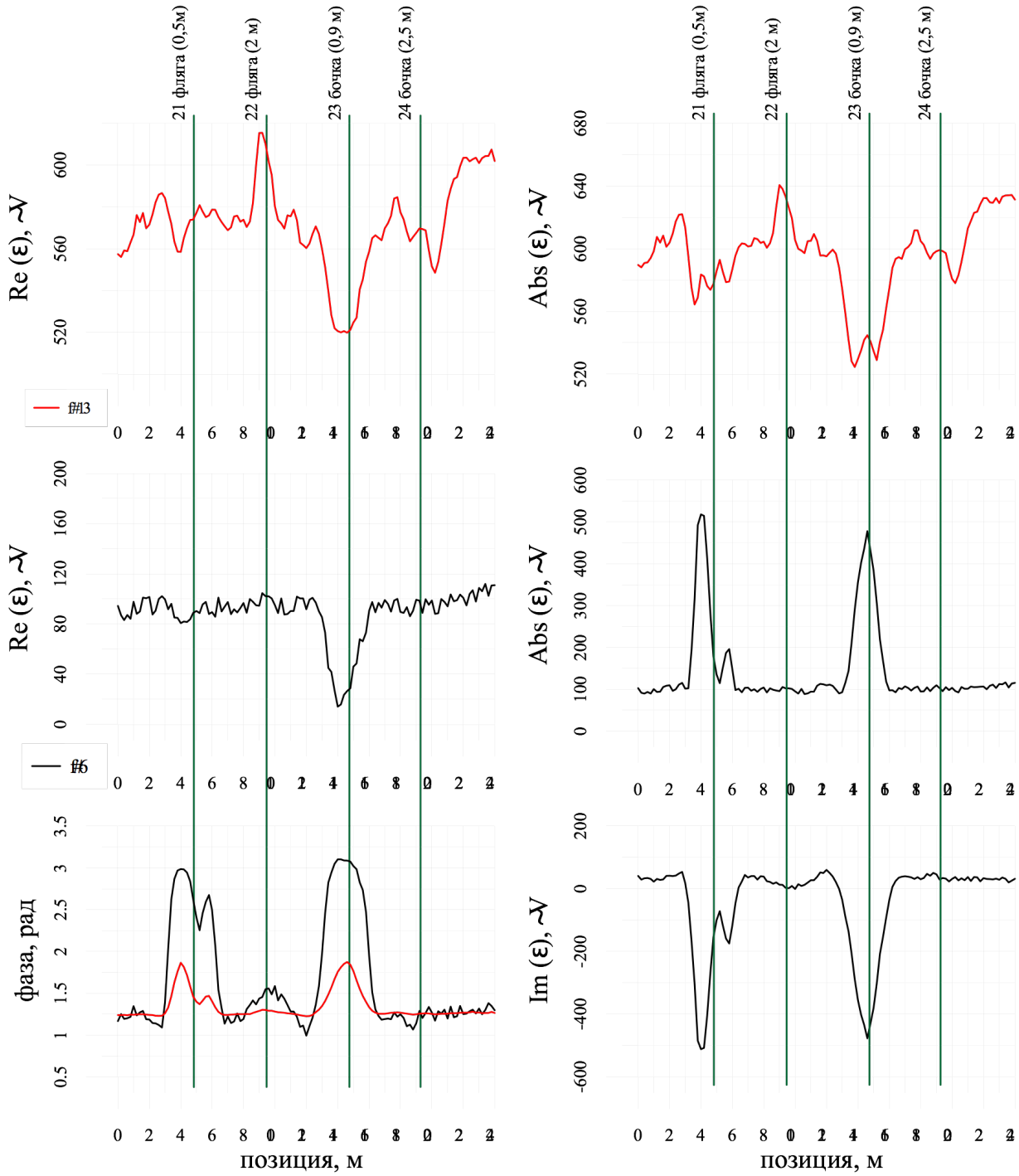


Рис. 23. Диаграммы сигнала ЭМС №29 вдоль профиля №1 (f#6=10 кГц, f#13=111 кГц)

На всех диаграммах (см. рис. 23) отчетливо выделяются мишени №21 и №23 (фляга и бочка, заложенные на малой глубине). На диаграмме отображающей фазу разностного сигнала, в сигнале на более низкой частоте (f#6=10 кГц), выделяется мишень №22. Эта же мишень выделяется в данных модуля и реальной части сигнала на диаграммах для более высокой частоты (f#13=111,1 кГц). На диаграммах модуля и реальной части сигнала на пикете 20 видно заметное уменьшение сигнала. Такое уменьшение наблюдается на обеих

отображенных частотах (f#6=10 кГц, f#13=111,1 кГц), этот пик может быть обусловлен мишенью №24, которая имеет наибольшую глубину заложения на данном профиле. Но этот факт ничем не подтверждается, так как подобное изменение сигнала не наблюдается на других диаграммах, а также не имеет отображения на площадной съемке. Мишень №21 на диаграммах имеет два пика. Этот факт связан с асимметрией аппаратуры ЭМС (две приемные катушки, расположенные на разном расстоянии с одной стороны от генераторной катушки) и небольшой глубиной заложения мишени (0,5 м).

На разрезах по профилю №1 (рис. 24) так же, как и на диаграммах, хорошо выделяются мишени №21 и №23, и первая имеет раздвоенный образ. Разрезы с фазой и мнимой частью сигнала наиболее информативны из всех ниже представленных разрезов. Помимо образов от мишеней №21 и №23 можно наблюдать и образ от мишени №22, но менее выраженный, что связано с большей глубиной заложения этой мишени.

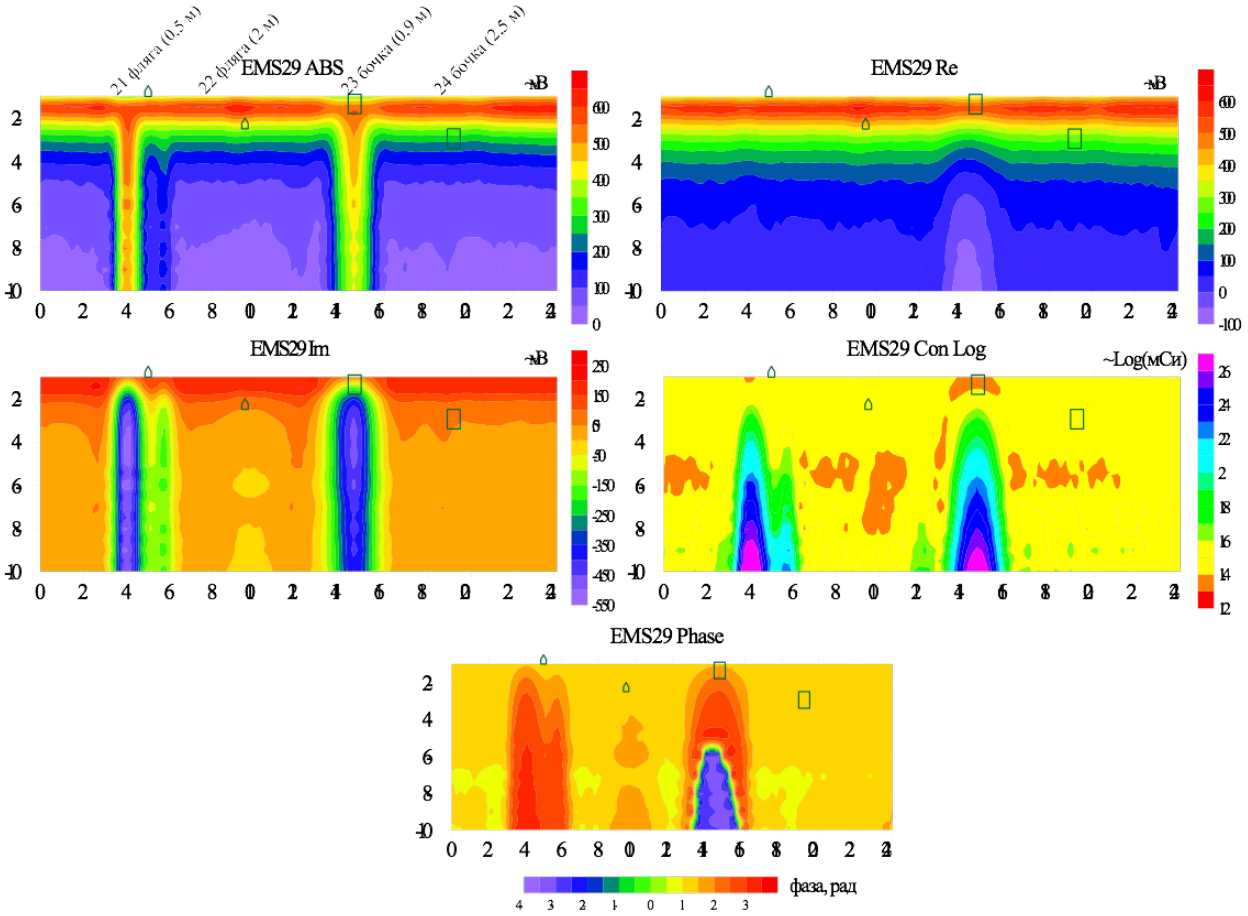


Рис. 24. Разрезы по данным ЭМС №29 вдоль профиля №1

2.2.2 Результаты работ по Блоку №2 (Профиль №2, Квадраты №№ 13 и 14)

На участке Блока №2 были выполнены следующие работы:

- съемка квадрата №13 с помощью ЭМС №27 в направлении ЮЗ-СВ,
- съемка квадрата №14 с помощью ЭМС №8 в направлении ЮЗ-СВ,
- зондирования вдоль профиля №2 с помощью ЭМС №№ 26, 27, 29.

Карты квадрата №14 (рис. 25) построены по различным параметрам. На каждой карте выделяются все мишени, заложенные на данном квадрате, так как глубина их заложения небольшая (до 1 м). Образы от мишеней на всех картах имеют четкие контуры, но карта, построенная по параметру фазы разностного сигнала, в отличие от других карт (карты распределения кажущегося сопротивления и карты распределения логарифма кажущейся проводимости) имеет более однородную структуру. Каждая мишень имеет разное количество образов на карте. Количество образов зависит от направления прохождения площадки аппаратурой и расположения мишени. Мишени №28 и №30 заложены вертикально. Но мишень №28 располагается вдоль направления, по которому велась съемка, а мишень №30 под углом к этому направлению. Поэтому мишень №28 имеет четыре образа на всех картах, мишень №30 три образа. Мишени №27, №29 и №31 заложены горизонтально, но мишень №27 заложена под углом к направлению прохождения площадки, в отличие от двух других мишеней. Поэтому у мишени №27 наблюдается два образа, а у мишеней №29 и №31 три. Асимметрия расположения образов относительно объекта связана с асимметрией прибора. Результаты площадной съемки по квадрату №13 (рис. 22) были описаны выше, в результатах работы на первом блоке.

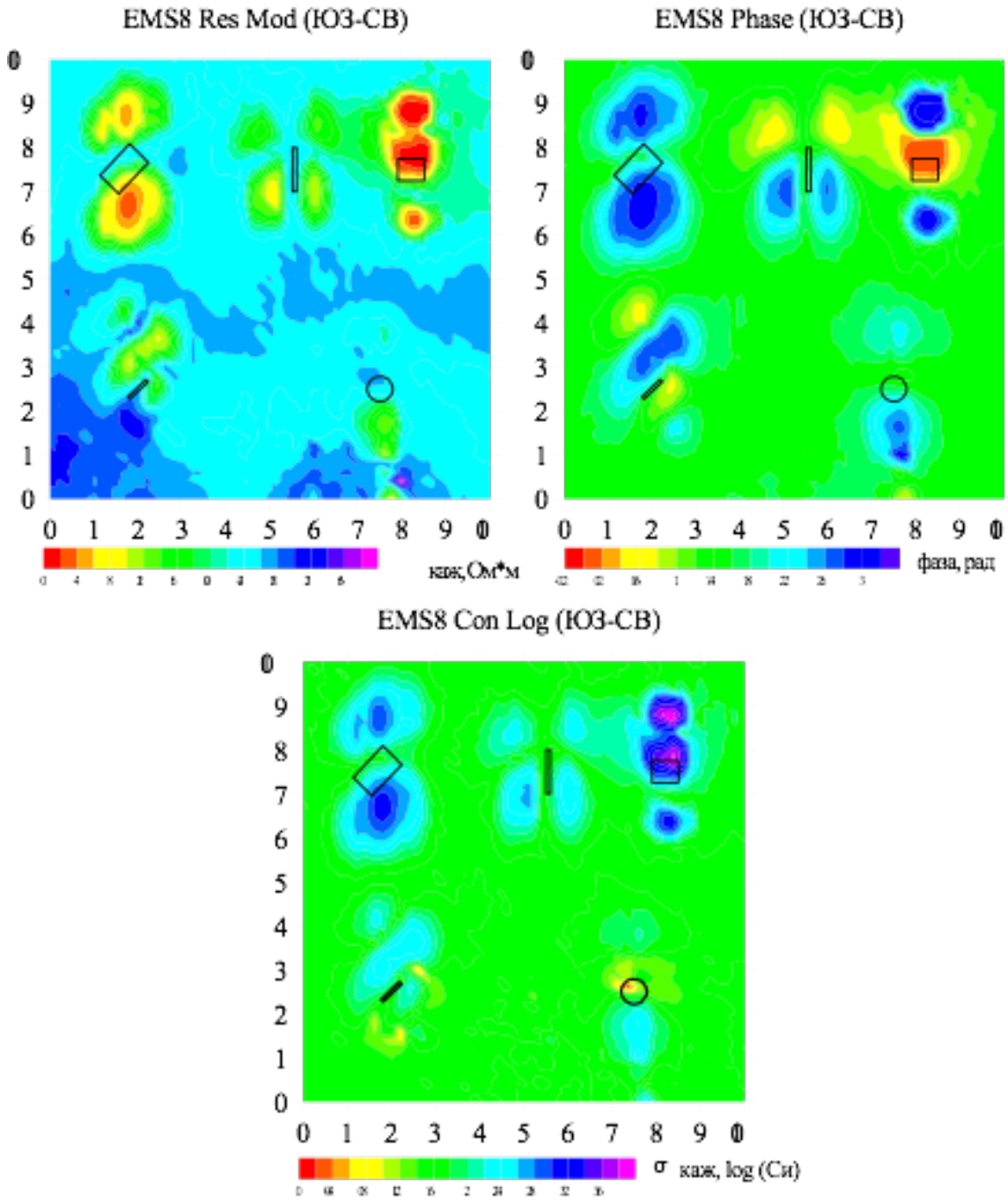


Рис. 25. Результаты площадных зондирований квадрата № 14. Частота на картах 3.9 кГц

Результаты, полученные при исследовании профиля №2, продемонстрированы далее на диаграммах (рис. 26) и разрезах (рис. 27).

Профиль №2 проходит через мишени, которые заложены на квадратах №13 и №14. Мишени, расположенные на квадрате №13, имеют меньшую глубину заложения, поэтому более заметно выражены в изменении сигнала на диаграммах. Первые три мишени (№27, №28 и №29) на профиле хорошо выделяются на всех диаграммах. У мишеней №28 и №29, имеющих наименьшую глубину заложения, на диаграмме модуля сигнала наблюдается

раздвоение пика. Особенно хорошо это заметно на более высокой частоте. Можно заметить, что на одной и той же диаграмме разные мишени могут быть выражены разным изменением сигнала. Мишени №27 и №28 на диаграммах реальной и мнимой частей сигнала (f#6=10 кГц) выражены его повышением, а мишень №29 понижением. Этот факт связан с малым расстоянием между мишенями на профиле, что приводит к суперпозиции образов от различных мишеней и переходом сигнала через ноль. Наиболее информативной диаграммой для выделения более глубоко заложенных мишеней №25 и №26 является диаграмма фазы разностного сигнала. На этой диаграмме наиболее четко выражено изменение сигнала при прохождении над этими объектами. Диаграммы реальной части сигнала также несут информацию о мишенях №25 и №26 в изменении сигнала. На высокой частоте (f#13=111.1 кГц) аномалии сигнала над этими объектами имеют большую амплитуду, чем на низкой частоте (f#6=10 кГц).

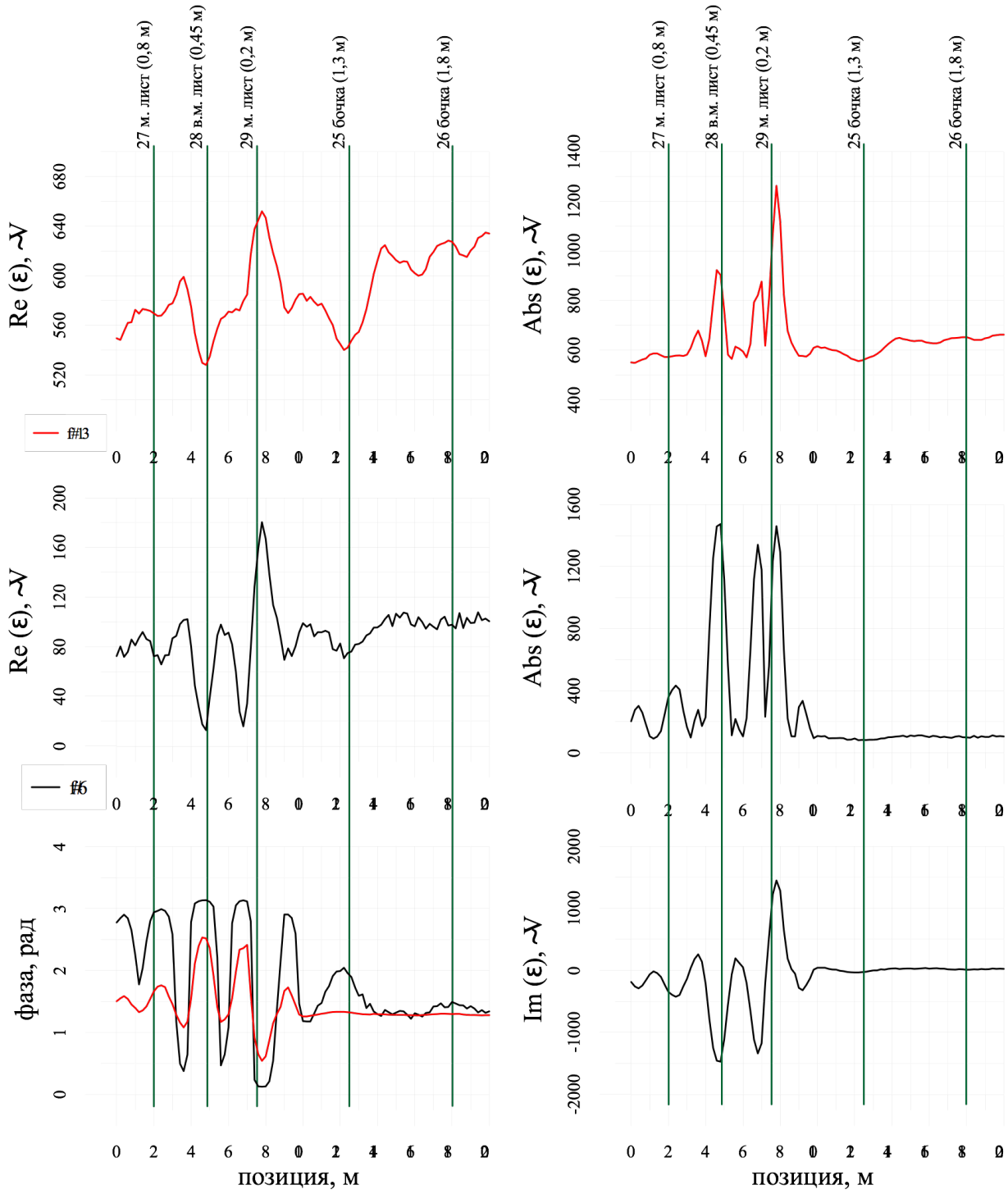


Рис. 26. Диаграммы сигнала ЭМС №29 вдоль профиля №2

На разрезах по профилю №2, построенных над мишенями №27, №28 и №29, аномалии выделяются достаточно ярко (рис. 27). Но на разрезе, построенном по реальной части сигнала, выделяются лишь мишени №28 и №29, которые имеют наименьшую глубину заложения. Более глубокие мишени №25 и №26 выражены на разрезах мнимой части сигнала и фазы разностного сигнала. Мишень №26 более четко выражена на разрезе

по фазе разностного сигнала. На разрезе, демонстрирующем логарифм распределения проводимости, можно выделить аномалию, обусловленную мишенью №25.

Можно отметить, что для выделения более глубоких мишеней диаграммы реальной части сигнала более информативны, чем диаграммы мнимой. На разрезах, для рассматриваемого участка, наоборот более глубокие объекты лучше видны на разрезах мнимой части сигнала, а разрезы по реальной части сигнала малоинформативны.

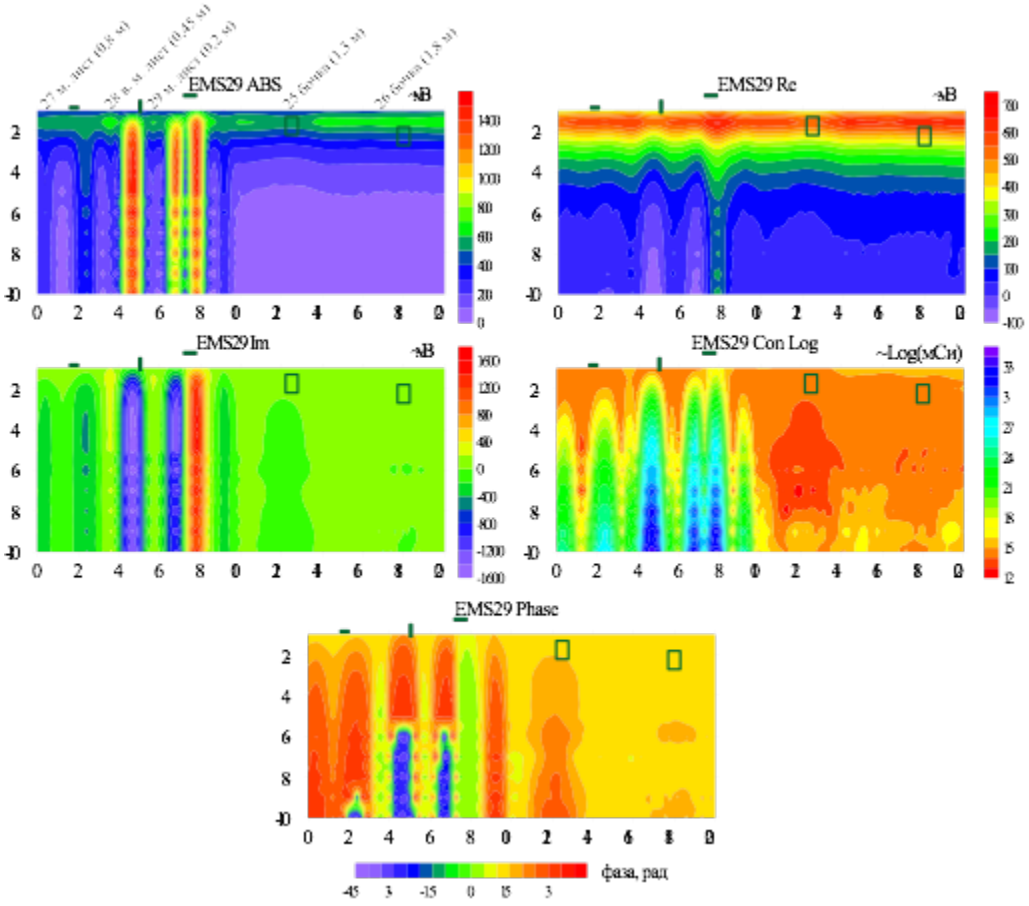


Рис. 27. Разрезы по данным ЭМС №29 вдоль профиля №2

2.2.3 Результаты работ по Блоку №3 (Профили №№ 4 и 5, Квадрат № 6).

На участке блока №3 были выполнены следующие работы:

- съемка квадрата №6 с помощью ЭМС №5 в направлении ЮЗ-СВ;
- съемка квадрата №6 с помощью ЭМС №5 в направлении ЮВ-СЗ;
- зондирования вдоль профиля №4 с помощью ЭМС №№ 26, 27, 29;
- зондирование вдоль профиля №5 с помощью ЭМС №27.

Площадное зондирование квадрата №6 было сделано в двух направлениях. Это дало возможность скорректировать координаты закопанных на нем мишеней. На картах (см. рис. 28) видны только мишени №8, №9 и №10, которые имеют большие размеры. На карте с направлением исследования ЮВ-СЗ видны по три образа от каждой из этих мишени, что соответствует прохождению каждой из трех катушек аппаратуры ЭМС над мишенью. На карте с направлением ЮЗ-СВ видно меньше образов. Это связано с расстоянием между объектами, которое сравнимо с длиной прибора, поэтому образы от разных объектов накладываются друг на друга.

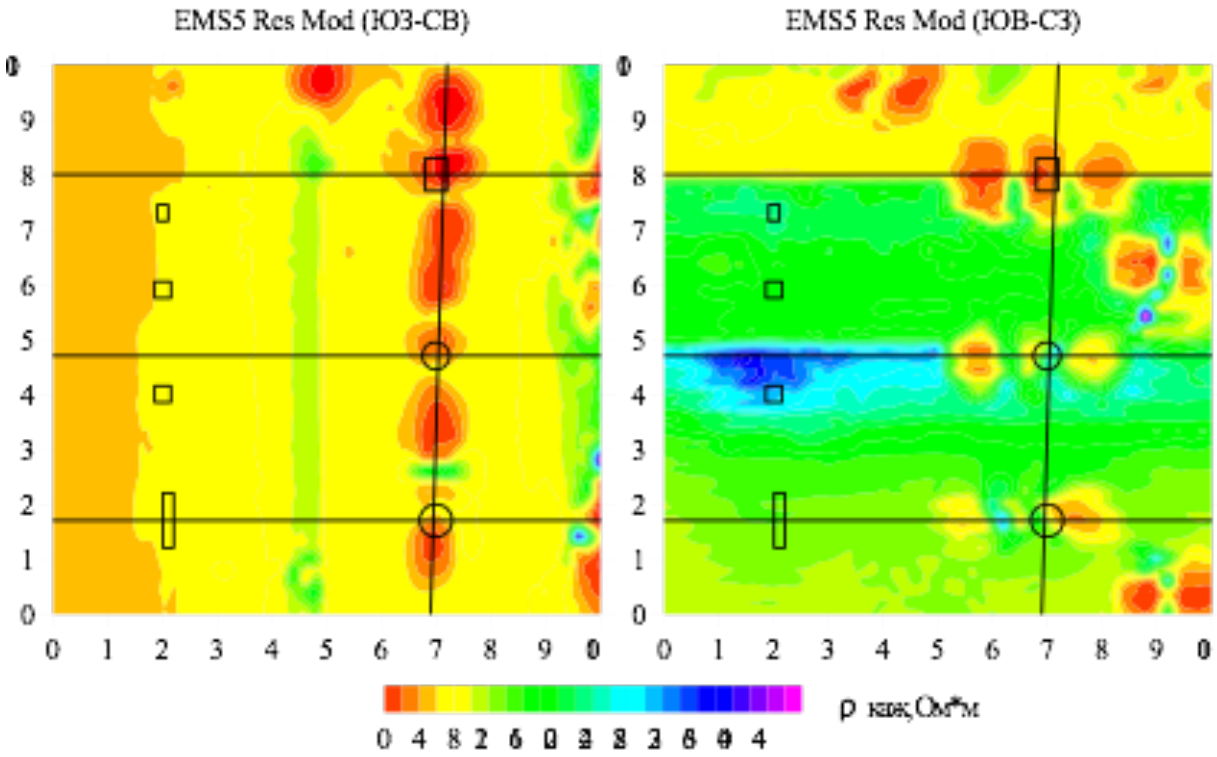


Рис. 28. Результаты площадных зондирований квадрата № 6. Частота на картах 5.1 кГц

Аномалии от мишеней в правой половине квадрата №6 имеют высокие значения, что затрудняет проявление аномалий меньшего уровня. Поэтому данные по левой части квадрата №6 были обработаны отдельно (см. рис. 29), чтобы выделить остальные мишени, расположенные на этом квадрате. Построены четыре вида карт для двух частот (f#3=3.19 кГц, f#13=111.1 кГц). Все мишени видны на картах модуля и реальной части сигнала для высокой частоты. Мишень №4, которая имеет наименьшую глубину

заложения, выделяется на картах, построенных по фазе разностного сигнала для обеих частот. На остальных картах данные объекты практически не выделяются.

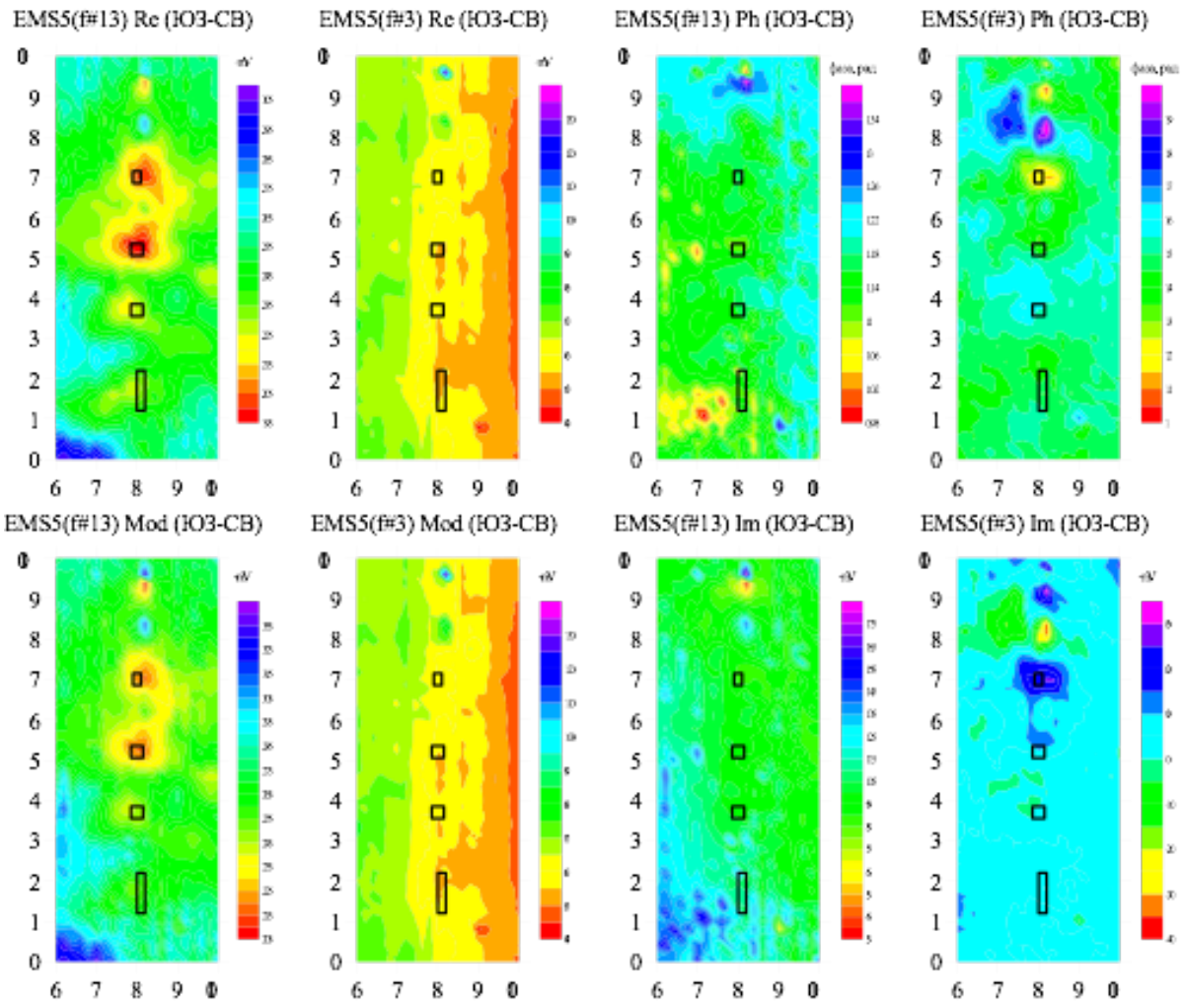


Рис. 29. Результаты площадных зондирований квадрата № 6.
Частоты на картах f#3=3.19 кГц, f#13=111.1 кГц

Профиль №4 проходит через квадраты №6 и №8, пересекает пять мишеней. Три мишени на первом и две на втором из квадратов. Мишени на квадрате №8 имеют большую глубину заложения, мишень №12 на глубине 1 м и мишень №13 на глубине 2 м. Мишени на квадрате №6 все заложены на глубину 0,5 м. В связи с этим, мишени на диаграммах (см. рис. 30) выражены аномалиями разной интенсивности. Мишени №12 и №13 хорошо выражены на диаграммах модуля и реальной части сигнала, особенно для высокой частоты. Мишени №8, №9 и №10 хорошо выделяются на всех диаграммах, но в отличие от двух других мишеней наибольшая амплитуда изменения сигнала над этими мишенями наблюдается на диаграмме мнимой части сигнала для более низкой частоты. На этой же диаграмме видно как проявляются три образа от каждой из трех менее глубоко

заложенных мишеней. По диаграмме с фазой разностного сигнала для низкой частоты выделяются все мишени кроме мишени №13, так как она имеет наибольшую глубину заложения. На диаграмме с высокой частотой выделяются только мишени с глубиной заложения 0,5 м (мишени №8, №9 и №10).

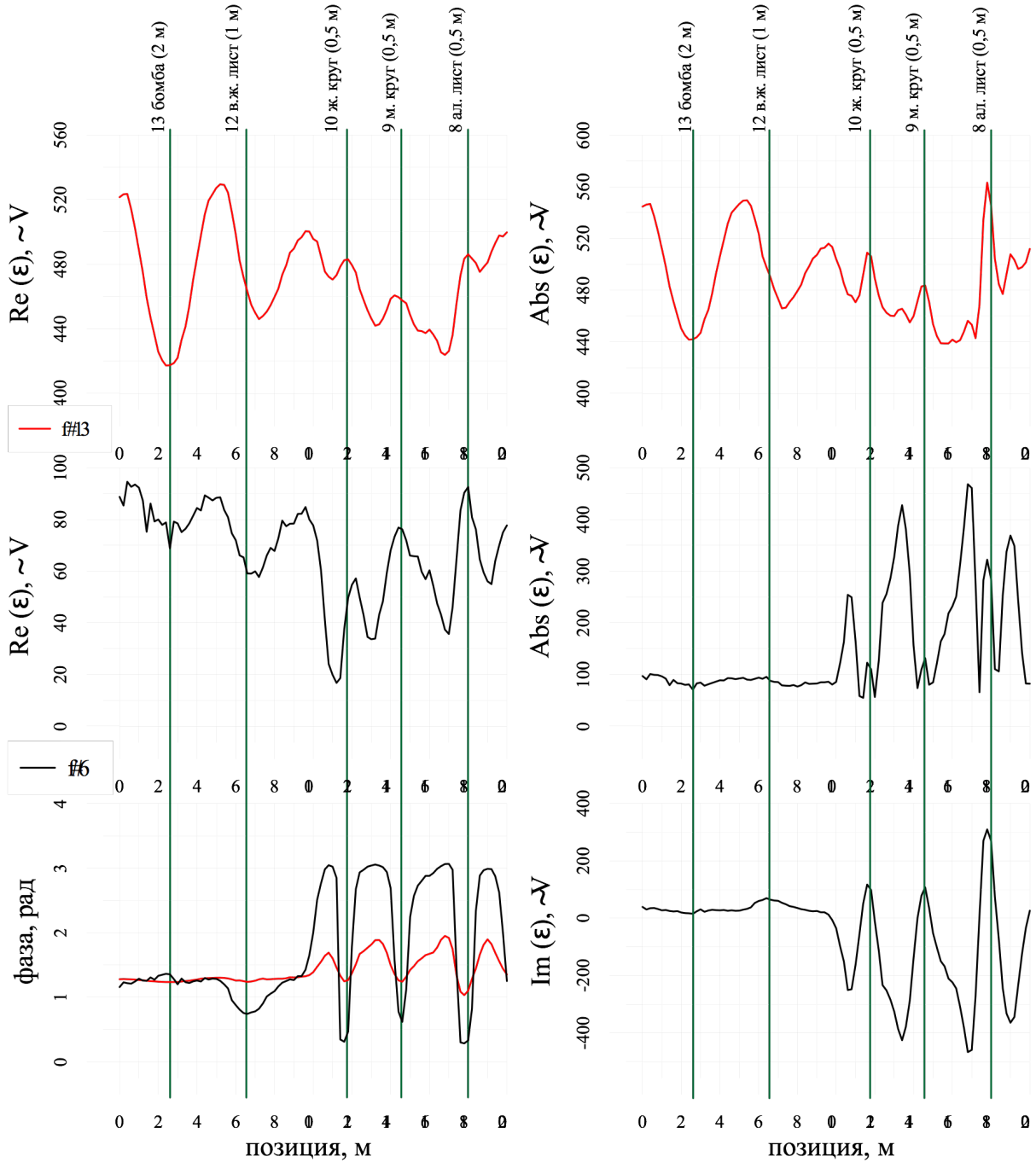


Рис. 30. Диаграммы сигнала ЭМС №29 вдоль профиля №4

На диаграммах по профилю №5 (рис. 31) положение аномалий не всегда совпадает с положением мишеней на профиле. Это может быть связано с ошибкой оператора при определении координат профиля и неправильным шагом измерений по профилю. На всех

диаграммах отчетливо выделяется только мишень №11, которая имеет наибольшую глубину заложения 2 м. На диаграммах модуля и мнимой части сигнала для более низкой частоты наблюдаются и другие аномалии, но их сложно связать с конкретными мишенями, так как их положение на профиле не совпадает с положением мишеней.

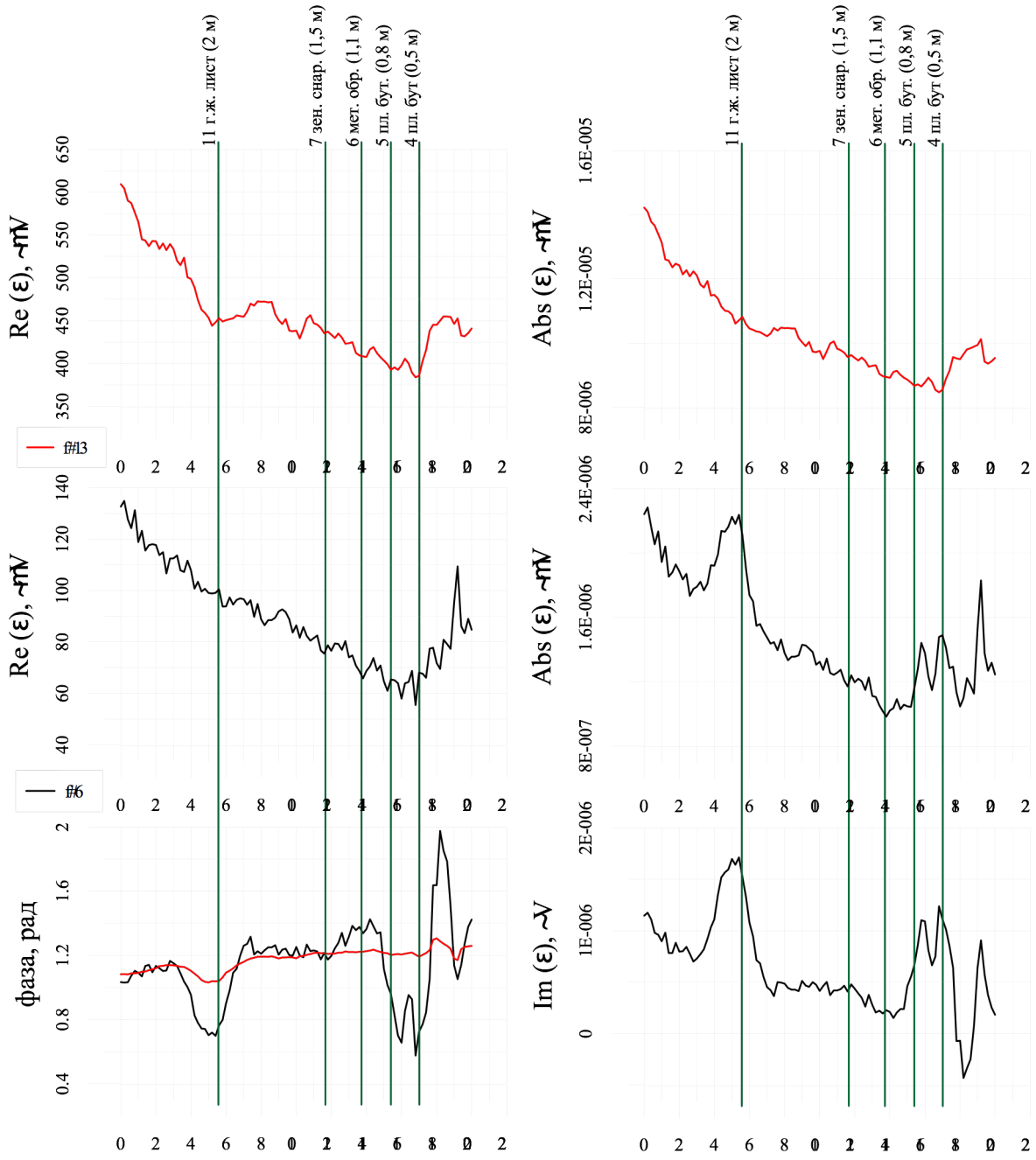


Рис. 31. Диаграммы сигнала ЭМС №27 вдоль профиля №5

Разрезы по профилю №4 (рис. 32) также как и диаграммы, достаточно точно отражают положение мишеней по профилю. На всех разрезах в виде аномалий отражаются мишени №8, №9 и №10 с глубиной заложения 0,5 м. Только на разрезе по

реальной части сигнала аномалии выражены нечетко. На всех остальных разрезах помимо этих трех мишеней выделяется мишень №12. Наиболее четко мишень №12 выражена на разрезе с фазой разностного сигнала, на котором также наблюдаются образы от мишени №13.

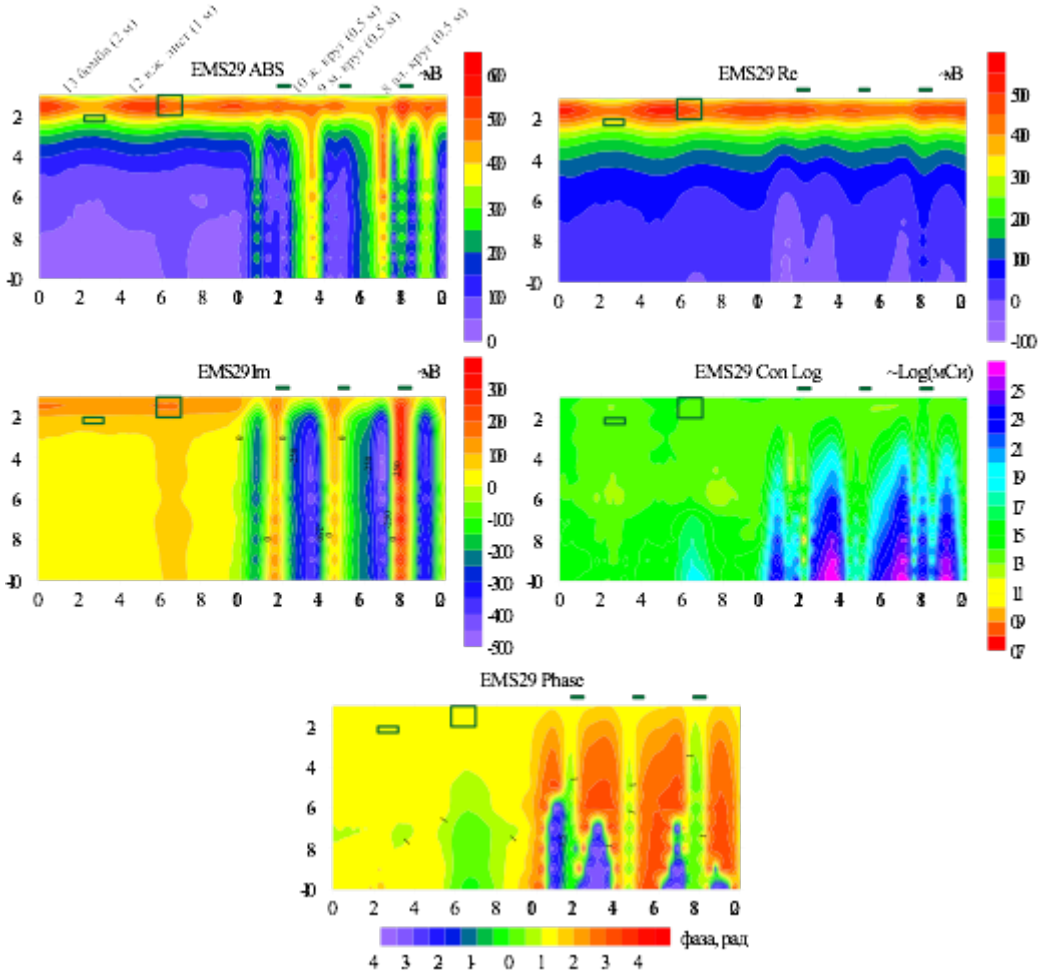


Рис. 32. Разрезы по данным ЭМС №29 вдоль профиля №4

На разрезах по профилю №5 (рис. 33) мишень №11 выявляется наиболее отчетливо. Разрез по реальной части сигнала не имеет ни одной аномалии, которая бы отражала положение того или иного объекта на профиле. Как и на всех предыдущих профилях, этот разрез менее информативен. На разрезе с фазой разностного сигнала помимо аномалии мишени №11 отчетливо выражено положение мишени №7 на профиле. Мишени номер №4 и №5 выделяются, но аномалии от этих мишеней частично сливаются. Мишень №6 наиболее четко выражена на разрезе, построенном по распределению логарифма проводимости.

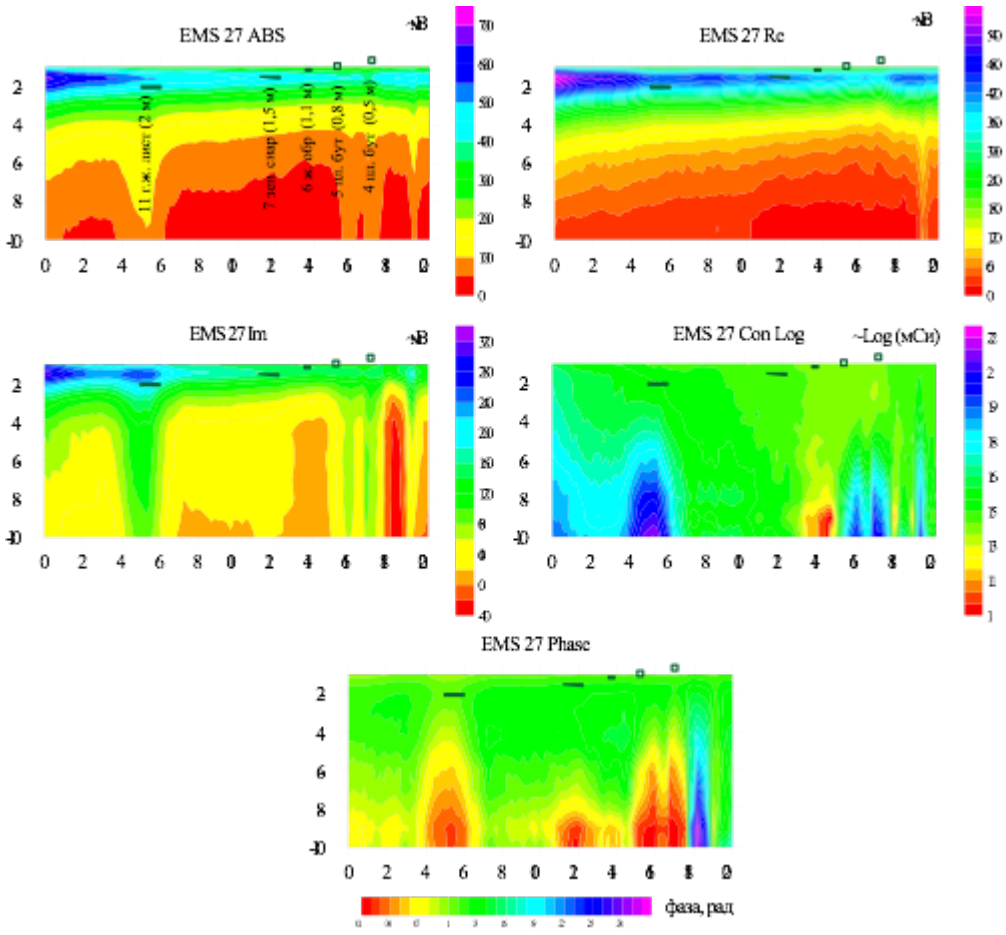


Рис. 33. Разрезы по данным ЭМС №27 вдоль профиля №5

2.3 Результаты работ методом электротомографии в режимах метода сопротивлений и вызванной поляризации вдоль профиля №1.

Электроразведочная станция Скала-48 предназначена для работы методом электротомографии, измеряя удельные сопротивления и вызванную поляризацию [Панин Г. Л., 2009]. Аппаратура позволяет коммутировать многоэлектродные косы с 48 выводами и выполнять измерения в автоматическом режиме.

Вдоль профиля № 1 (рис. 20) были проведены исследования методом электротомографии в режиме измерения сопротивления и вызванной поляризации. Были применены различные установки (см. рис. 34 и рис. 35): Шлюмберже (SCH), двухэлектродная (PP), прямая и обратная трехэлектродная (PD), дипольная(DD), а также мультиградиентная (MG). Были проведены инверсии результатов на ограниченной и расширенной (на графиках отмечено индексом **ext**) сетке сопротивлений.

Разрезы, полученные инверсией по сопротивлению, отображают геологическое строение среды вдоль исследованного профиля. Отчетливо демонстрируются различия в глубине исследования при использовании различных установок, а также различия разрешающей способности и артефакты инверсии. Локальные проводящие металлические объекты в геоэлектрических разрезах не проявляются. Инверсия данных вызванной поляризации, полученных дипольной установкой (рис. 35) локализует все четыре заложенные мишени (две алюминиевые фляги и две металлические бочки, см. таблицу 1). Более глубокие мишени выделяются не так отчетливо, как те, которые заложены на меньшей глубине. Можно наблюдать несколько артефактов инверсии, которые в случае реальных полевых работ возможно интерпретировать как имеющийся металлический объект. Перспективным представляется апробация других типов установок в режиме вызванной поляризации, а также вариация параметров инверсии по параметрам вызванной поляризации [Бобачев А. А., 2005].

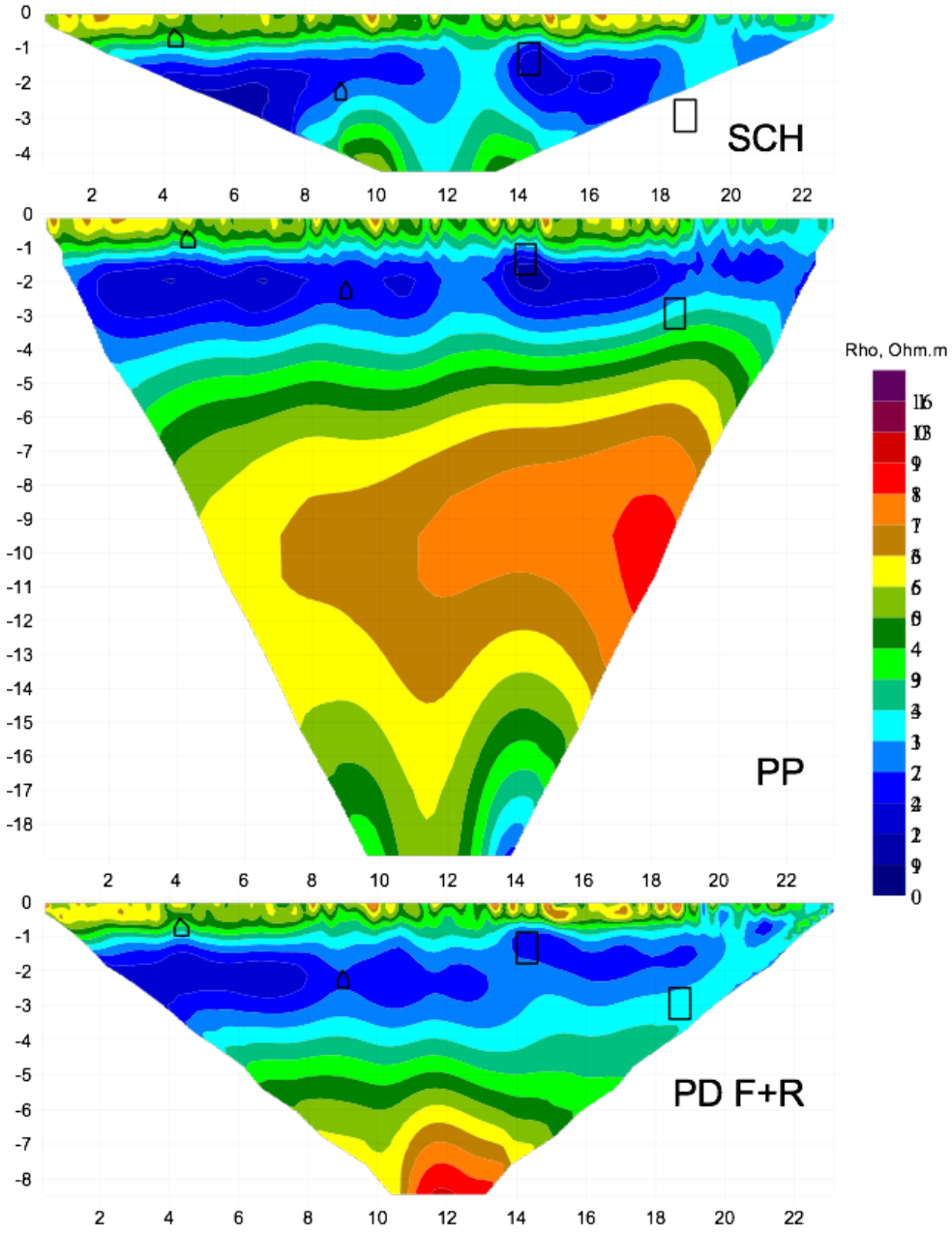


Рис. 34. Результаты двухмерной инверсии данных электротомографии, полученных на тестовом профиле с помощью установок Шлюмберже, двухэлектродной, а также прямой и обратной трехэлектродной

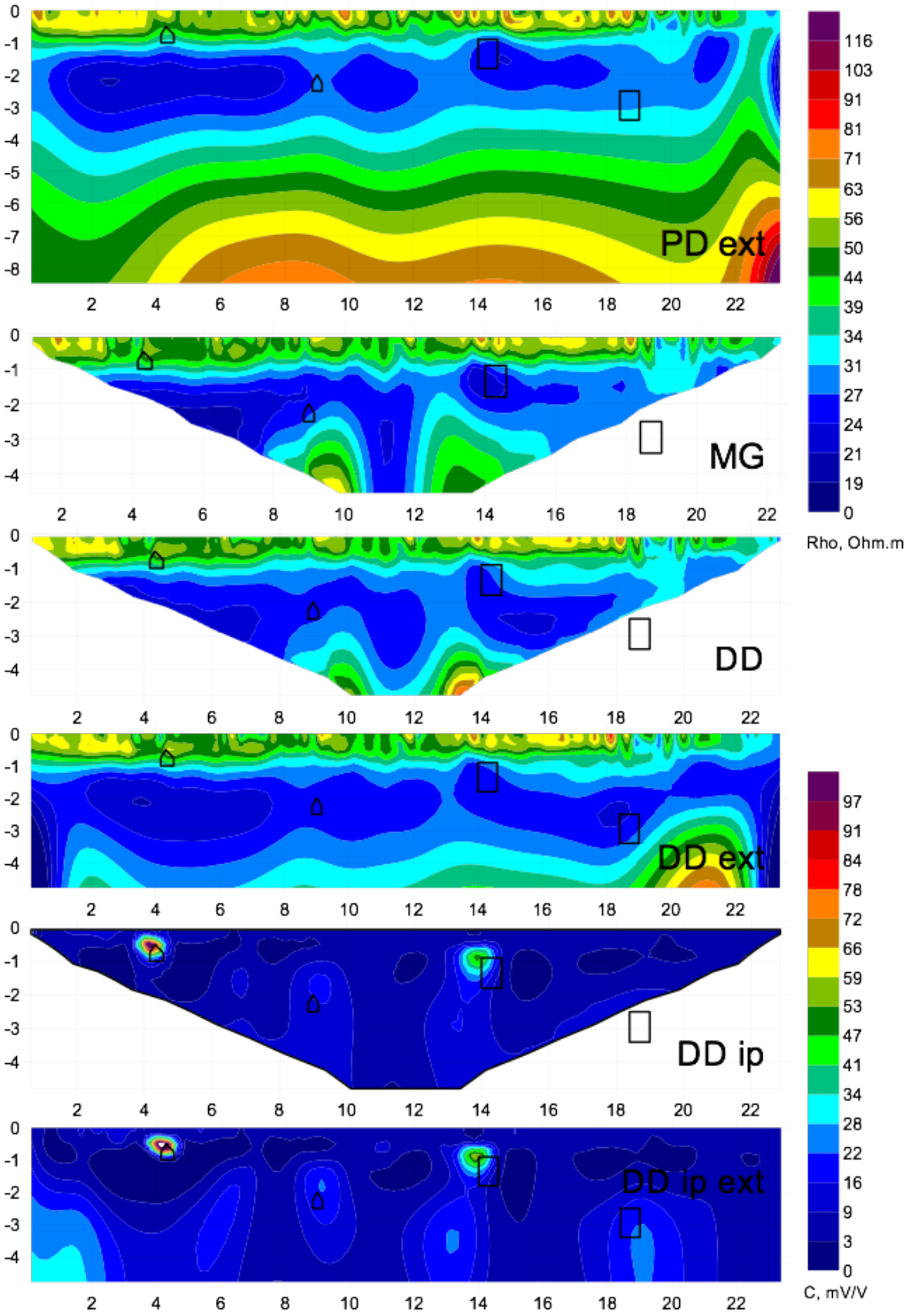


Рис. 35. Результаты двухмерной инверсии данных электротомографии, полученных на тестовом профиле с помощью трехэлетродной и дипольной установок

2.4 Дискриминация цветных и черных металлов

В работе [Светов Б. С., 2008] приведены диаграммы (см. рис. 36), описывающие кривые зондирования над цветным и черным металлами. Графики имеют характерные особенности, проявляющиеся в качественном отличии кривых реальной и мнимой частей сигнала.

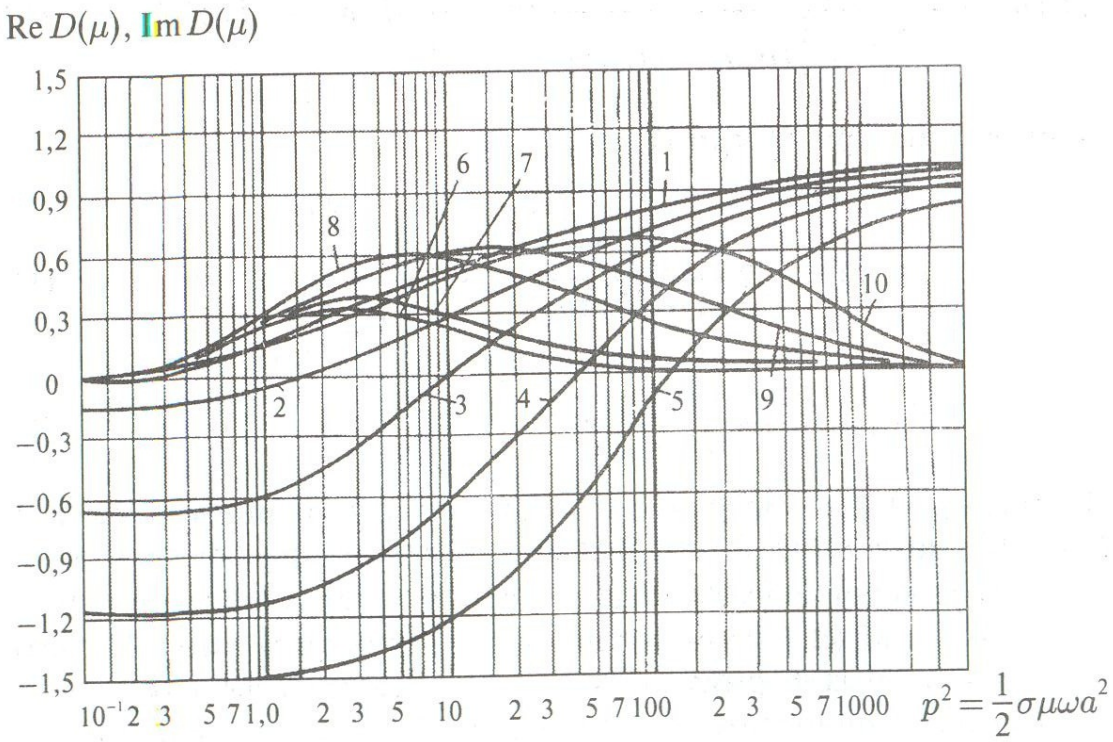


Рис. 36. График функции $D_1(\mu)$. $1-5-\mathrm{Re}\,D_1(\mu), 6-10-\mathrm{Im}\,D_1(\mu)$. Кривым 1 и 6; 2 и 7; 3и 8; 4 и 9; 5 и 10 соответствуют $\mu_1/\mu = 1{,}0;\ 1{,}25;\ 2{,}5;\ 5{,}0;\ 10{,}0$.

Для исследования возможности дифференциации металлов с помощью метода МЧЗ, реализованного в аппаратуре ЭМС был проведен следующий эксперимент. На одном и том же профиле попеременно были расположены различные металлические листы (медный, алюминиевый и железный). Длина профиля 20 м, шаг по профилю составлял 0,5 м. Было получено три набора кривых, при прохождении профиля над каждым объектом. Ниже приведены графики изменения сигнала по профилю (рис. 37). Анализу подверглись кривые зондирования для реальной и мнимой частей сигнала для каждого пикета. В зависимости от пикета характер кривых существенно меняется. Даже при наличии существенного полезного сигнала от металлических объектов, кривые не всегда имеют характерные отличия. На пикете 10 м, в районе расположения металлических листов,

характер кривых над железным листом и листами из цветных металлов существенно отличается (рис. 38). Особенности кривых согласуются с результатами, опубликованными Световым Б. С. (см. рис. 36).

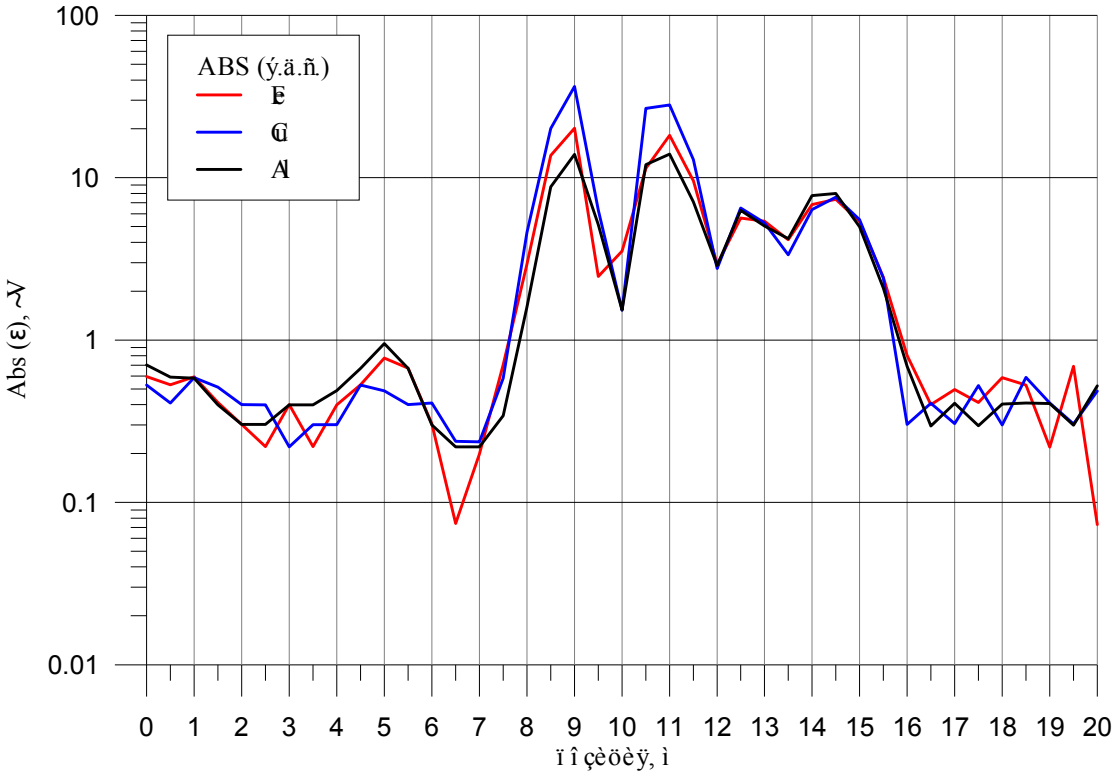


Рис. 37. Изменение модуля сигнала по профилю для каждой металлической мишени

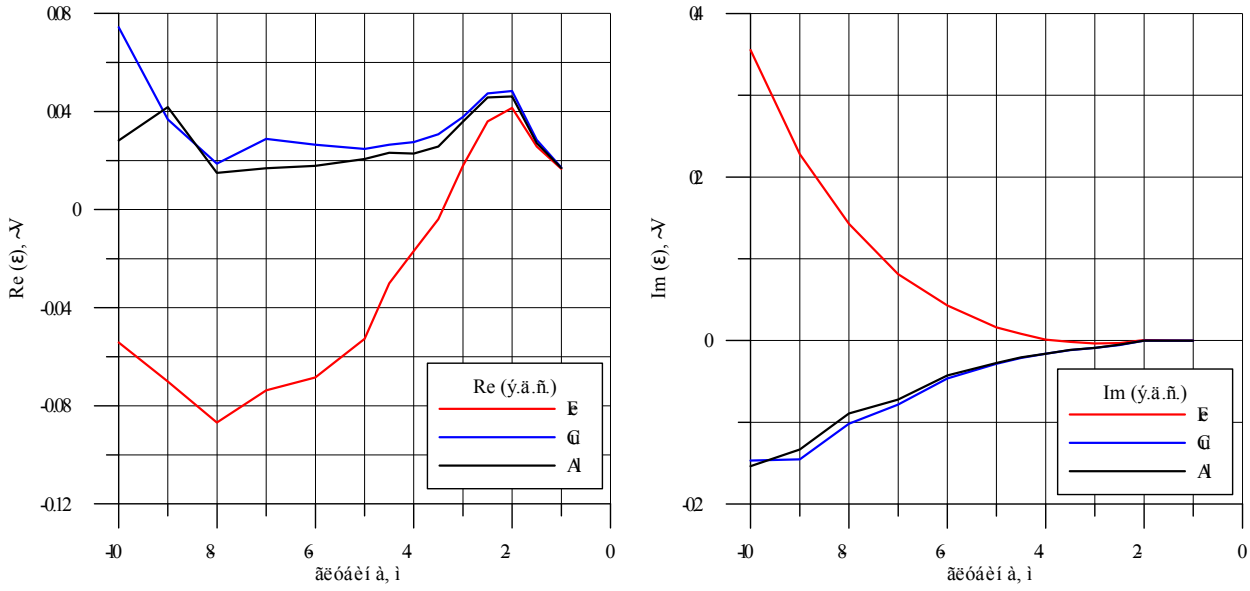
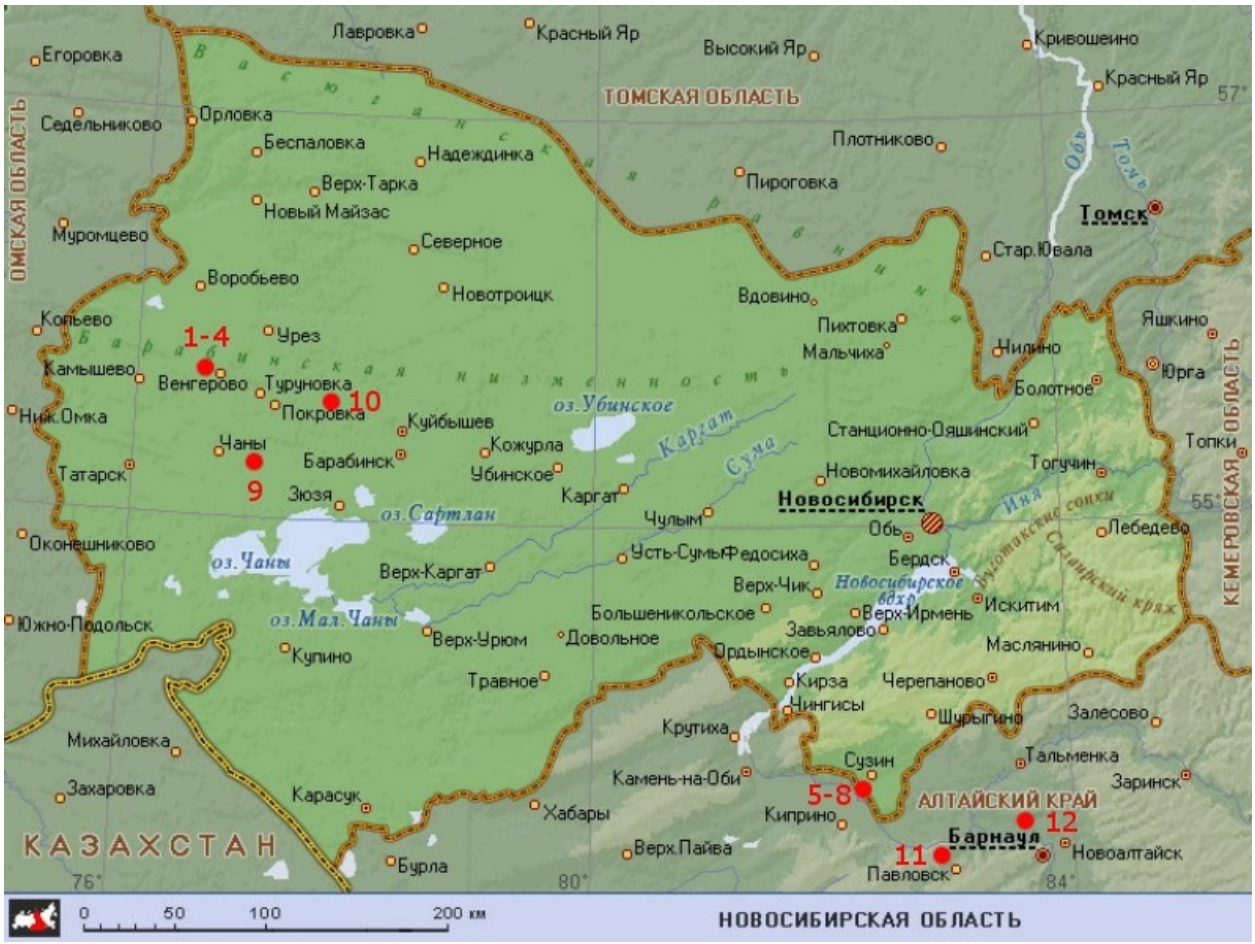


Рис. 38. Графики зависимости сигналов Re и Im частей от частоты для пикета 10 м

3. ПОЛЕВЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АРХЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Геофизические и археологические работы проводились на территории Новосибирской области и Алтайского края.



Расположение исследованных памятников на карте Новосибирской области и Алтайского края. 1-4 – комплекс памятников в устье р. Тартас (Старый Сад, Венгерово-6, Тартас-1, Тартас-2); 5-8 – курганные могильники Новосибирского Приобья (Камышенка-1, Камышенка-3, Лесниковский-1, Копинка-1); 9 – курганный могильник Аул-Кошкуль-1; 10 – курганный могильник Погорелка-2; 11 – памятник Телеутский Взвоз-I; 12 – курганный могильник Кармацкий

Исследованы геофизическими методами и прошли археологическую проверку площади исследованные методом магнитометрии, всего 37790 м^2. площадь частотного зондирования 3125 м^2.

Выполнены геофизические работы без проверки вскрытием. Электротомография на постоянном токе в варианте 3D. всего 1600 м^2. Площадь частотного зондирования 1600 м^2.

В настоящем отчете приведены данные по исследованию наиболее характерных объектов.

Курганный могильник Погорелка-2

Памятник находится в 2,5 км к западу от одноименного села и представляет собой обширную группу крупных курганных насыпей (42 объекта), с двумя земляными сооружениями диаметром около 60 м и высотой 2,5 м.

Работы на кургане № 1 проводились в 2008 и 2011 году комплексом геофизических методов. Ниже (рис. 39) представлена карта распределения кажущегося удельного сопротивления (УЭС), рассчитанного по сигналу частотного зондирования (слева) и трехмерное построение по данным трехмерной электротомографии (справа). Данные 2008 г.

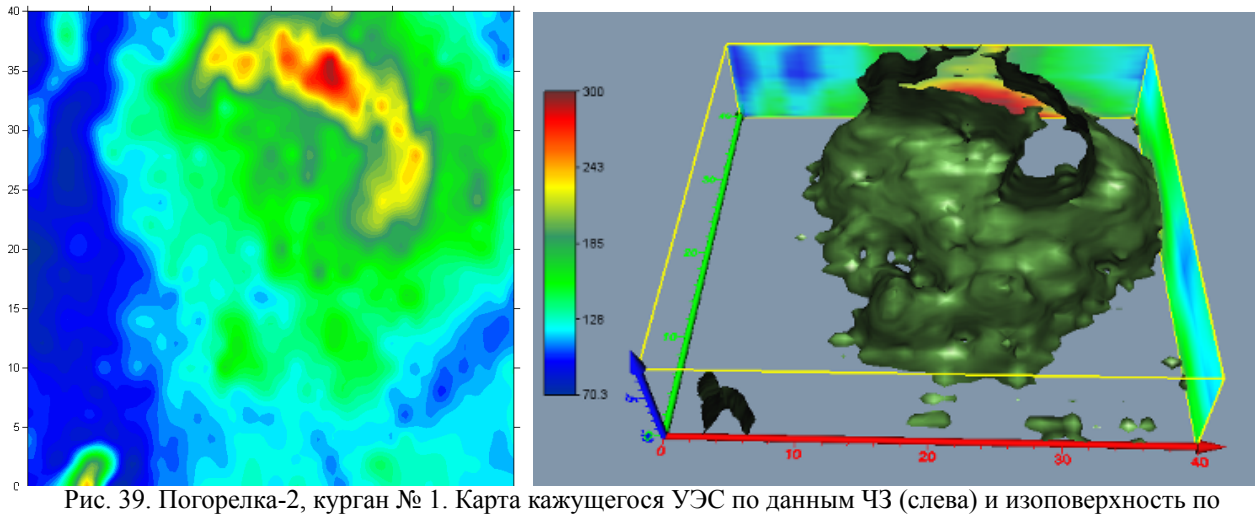


Рис. 39. Погорелка-2, курган № 1. Карта кажущегося УЭС по данным ЧЗ (слева) и изоповерхность по значению 150 Ом*м (справа) по данным электротомографии

В 2011 г. совместной российско-германской экспедицией Института археологии и этнографии СО РАН и Евразийского отделения Германского археологического института был исследован *курган 13* (рис. 40). До начала раскопок, для поиска под слоем пашни конструктивных особенностей, не выявленных магнитометрией, и сопоставления с ними объекта с архитектурой квадратной формы, была применена технология частотного

электромагнитного зондирования аппаратурой ЭМС на площади 625 м^2. Для разметки участка использовались реперы магнитометрической съемки. Сооружение вписали в квадрат, размерами 25×25 м^2. Измерения проводились

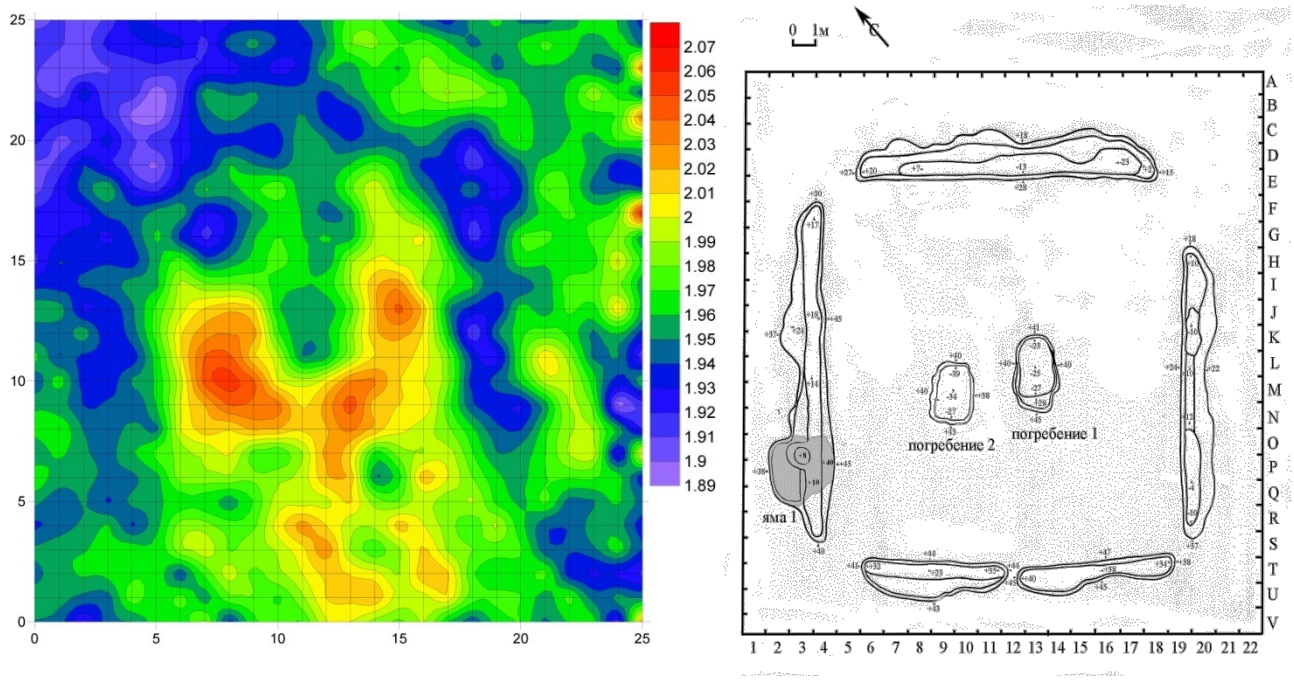


Рис. 40. Погорелка-2, курган 13. Карта ЧЗ на частоте 40 кГц (слева), результаты вскрытия (справа)

по профилям ЮЗ-СВ, в углах равномерной сетки с шагом 1 м. В результате были построены геоэлектрические карты распределения измеряемых параметров на 14 частотах. В данном случае наиболее четкая картина проявилась на частоте 40 кГц. Под слоем пашни выявлена аномальная структура, по размерам сопоставимая с курганом.

Геофизические данные позволили определить не только границы раскопа над выбранным объектом, но и направления бровок для максимально информативного изучения стратиграфической ситуации. Результаты археологических раскопок показали, что данные магнитометрического картирования очень четко соответствуют планиграфическому расположению археологических ям. Аномальный объект на геоэлектрических картах соответствует размерам площадки, ограниченной рвом. Внутри этой аномалии выделяются области, которые сопоставляются не с погребениями, а с выбросами материкового грунта из могильных ям. Эта материковая

площадка хорошо выделялась после разборки горизонта 1. Таким образом, данные магнитометрических и геоэлектрических исследований существенно дополняют друг друга.

Курганный могильник Старый Сад

Памятник, открытый В.И. Молодиным в 1983 г., находится в 5 км к юго-западу от с. Венгерово, на южном краю террасы Государева озера. Могильник частично распахан и занят лесным массивом. На площади памятника размещались карьеры для добычи глины, в результате чего некоторые насыпи были разрушены или завалены отвалами. Аварийное состояние объекта усугублялось, также, обустройством противопожарных рвов. Все это обусловило необходимость скорейшего исследования памятника и в 1983-84, 1987 годах курганный могильник (около 90 насыпей) был изучен практически полностью.

В 2009 г. во время обследования памятника было выявлено еще несколько насыпей, расположенных как в лесу, так и на пашне. Характер этих объектов позволял предположить, что они относятся к эпохе бронзы. В 2010-11 гг. на четырех из них была сделана магнитометрическая съемка методом вертикального градиента.

В 2010 г. на памятнике Старый Сад, в западной части курганного поля было исследовано два участка, общей площадью 1500 кв. м. Участок 1, размерами 30×36 м^2, располагался на вспаханном поле, на границе с лесом и включал слабо выраженный в рельефе ***курган 97***. На полученной магнитограмме, немного южнее центра участка выделяется округлая магнитная аномалия, размерами около 2,5×2 м^2, со значением 6,5 нТл, соответствующая по своим параметрам археологическому объекту. Вокруг нее фиксируются аморфные области с магнитными показателями в 1,5-3 нТл (рис. 41). На основании анализа магнитограммы и поверхностного рельефа, до начала археологических работ был сделан вывод о наличии на данном участке курганной насыпи без рва, с ямой в центре.

Над аномалией был заложен раскоп, размерами 18×17 м^2, с двумя перпендикулярными бровками для фиксации стратиграфических разрезов.

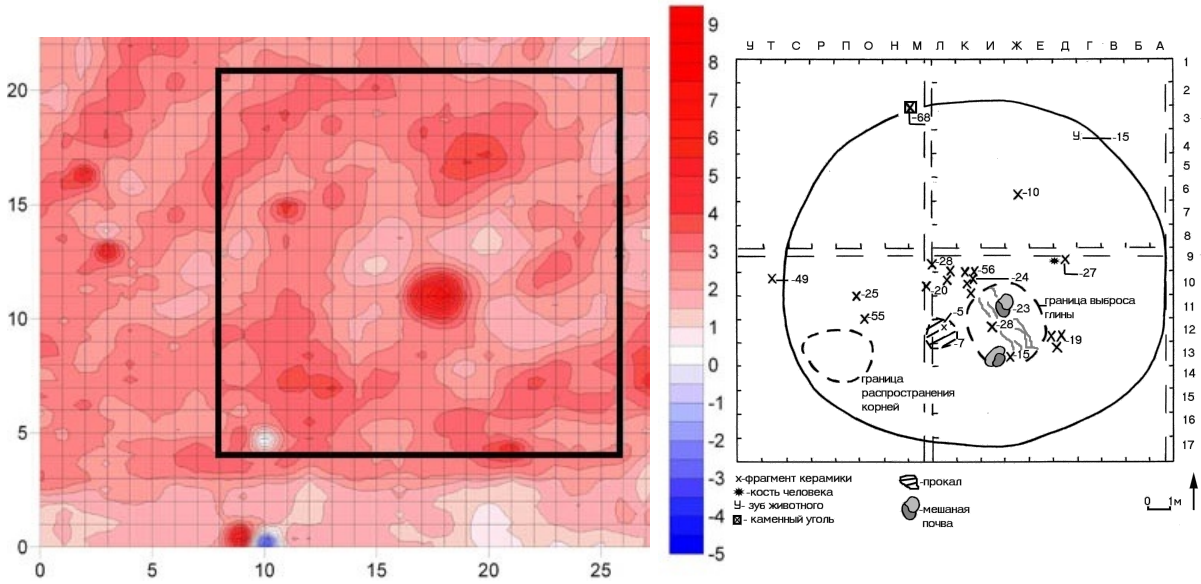


Рис. 41. Старый Сад, курган 97. Магнитограмма (слева) и план насыпи (справа)

По нивелировочным отметкам на современной дневной поверхности выделяется насыпь длиной около 8 м. Довольно разнородная картина залегания слоев и отсутствие каких-либо закономерностей в их локализации, вероятнее всего, связаны с последствиями многолетней распашки кургана. По-видимому, по этой же причине не фиксируется зависимость между количественными и качественными характеристиками слоев и величиной магнитных параметров. В квадрате К, И/10-11 на уровне зачистки материка выявлено погребение № 1. Яма почти прямоугольной формы, размерами 1,9×1,5×0,5 м^3, ориентирована длинной осью по линии З-В. Локализация этого объекта полностью совпадает с данными магнитометрии. Особенности погребального обряда и орнаментации керамики позволяют отнести курган 97 к Андроновской культуре эпохи бронзы.

Курганный могильник Венгерово-6

Памятник расположен на второй высокой надпойменной террасе правого берега р. Тартас в 2,5 км к югу от с. Венгерово. Исходя из высотных отметок, отметим, что этот курган был сооружен, очевидно, для незаурядного лица или группы лиц.

Геофизические исследования производились методами магнитного и геоэлектрического картирования. Курган был заключен в центр участка, размерами 50×50 м. Магнитометрические исследования производились по методике, отработанной на курганах могильника Старый Сад. Границы внешнего рва, выявленного геомагнитным картированием, совпадают с визуально фиксируемой насыпью. Магнитный фон характеризуется наличием большого количества хаотично расположенных неоднородностей, что связано, по-видимому, с распашкой. Участок засорен металлическими предметами. На полученной магнитограмме отчетливо выделяются два кольцевых рва, погребение в центре и периферийные ямы в юго-западной части кургана (рис. 42). Магнитные показатели аномалий, предположительно вызванных археологическими объектами, варьируются в пределах 4,5-6,5 нТл, а для погребения № 1 они достигают 8,5 нТл. Не вызывает сомнений, что именно отсутствие насыпи позволило в данном случае получить очень четкую картину планиграфического размещения объектов внутри кургана.

Геоэлектрическое картирование производилось в единой с магнитометрией сетке прибором ЧЗ ЭМС-8 на 14 частотах. Движение по профилям происходило от юго-западного угла участка в направлении запад-

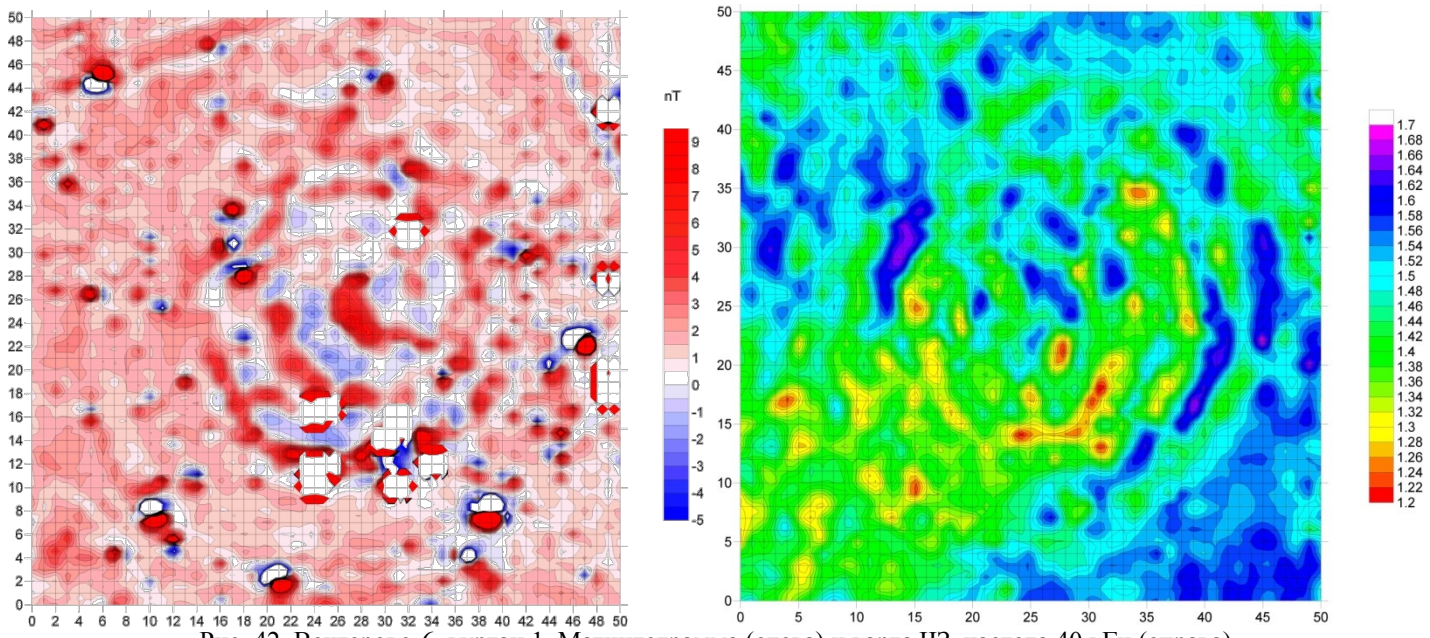


Рис. 42. Венгерово-6, курган 1. Магнитограмма (слева) и карта ЧЗ, частота 40 кГц (справа)

восток. Измерения выполнялись в углах равномерной сетки с шагом 1 м. Результаты частотного электромагнитного зондирования подтвердили наличие двух рвов, а также археологических объектов на ограниченной рвами площадке (рис. 42).

После удаления остатков насыпи кургана были выявлены два концентрических рва и пять погребений. Вся внутренняя площадка кургана сильно повреждена норами и грабительскими ямами. Расположение объектов раннего железного века, а также ям более раннего времени полностью совпадает с данными геофизического мониторинга.

Памятник Тартас-1

В настоящее время памятник является одним из основных полигонов для археолого-геофизических исследований. Это один из крупнейших некрополей, содержащий погребения и ритуальные комплексы практически всех известных в регионе культур от ранней поры бронзового века до периода позднего средневековья включительно. Археологические объекты исследуются здесь ежегодно сплошной площадью и с самого начала раскопки происходили параллельно с геофизическими исследованиями. Оптимальным методом для этого памятника является магнитометрия, что подтверждает высокий процент совпадения аномалий с археологическими объектами. В 2010-11 гг. по отработанной ранее методике было исследовано 19050 м^2 площади памятника, из них в северном направлении 18750 м^2. В результате, были выявлены северная и западная периферии памятника. Расположение и ориентация рядов аномалий на этих участках совпадает с археологически изученными погребениями. На участках 2010 г. выявлен ряд из двух, а возможно и трех полностью распаханных курганных насыпей, ориентированный по линии ЮЗ-СВ. Таким образом, магнитометрический метод еще раз доказал свою эффективность для исследования не выраженных в рельефе археологических объектов.

В 2010 году на Тартасе-1, ориентируясь на данные магнитограмм, была вскрыта площадь 2100 м^2, на которой выявлено 65 погребальных комплексов и 56 ям, имеющих ритуальное значение. В 2011 г. сплошной площадью вскрыто 1575 м^2. Изучено 67 погребальных комплексов различных эпох и культур, а также 57 ям, значительная часть которых имела ритуальное значение. Выявлены взаимосвязи между интенсивностью магнитных параметров и глубинами и характером заполнения могильных ям.

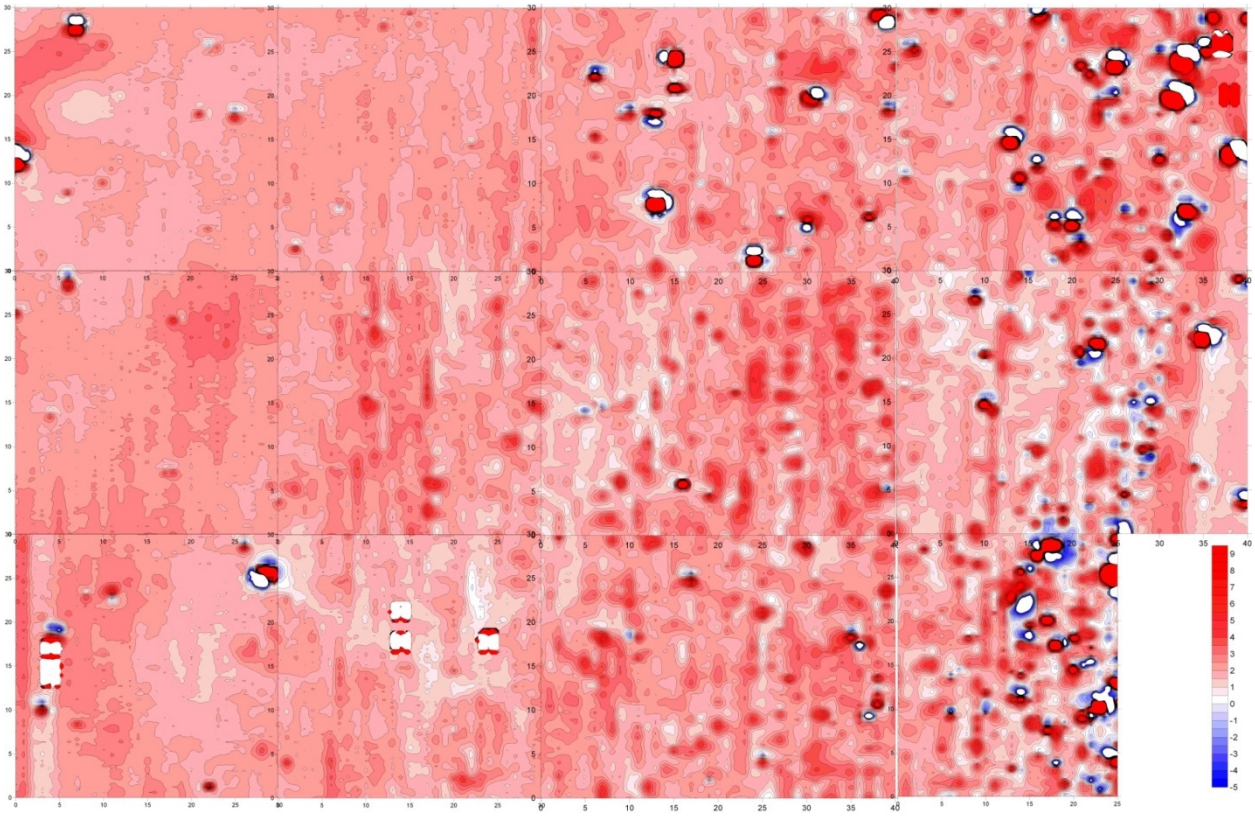


Рис. 43. Тартас-1. Магнитограмма участков 2010 г

В рамках археолого-геофизического исследования памятника Тартас-1 в 2010 г. на одном из участков раскопа, геомагнитная карта которого была построена нами ранее, были произведены опытно-методические работы, направленные на оценку степени влияния слоя поверхностного гумусированного грунта на картину размещения и магнитометрические показатели археологических объектов.

Установлено, что магнитные карты, выполненные на разной высоте измерений, по своим параметрам существенно не отличаются. Результаты

съемки (рис. 43) показали, что именно заполнение ям погребений верхним почвенным слоем является причиной регистрируемых нами магнитных аномалий над погребениями на этом памятнике. Полученные количественные значения магнитной восприимчивости и их сопоставление с интенсивностью магнитных аномалий, зарегистрированными над погребениями, позволяют существенно повысить достоверность интерпретации аномалий в пределах памятника Тартас-1. Археологическая проверка полностью подтвердила геофизические построения.

Памятник Телеутский Взвоз-I

Памятник находится на высоком, разрушающемся мысу левого коренного берега р. Обь, в 5 км к северо-востоку от с. Елунино Павловского района Алтайского края. За годы систематических исследований, организованных сотрудниками Алтайского госуниверситета, было установлено, что памятник Телеутский Взвоз-I представляет собой конгломерат погребально-поминальных и других объектов целого ряда древних и средневековых культур.

Остаются неизученными около 30 насыпей из визуально зафиксированных во время обследования площади в конце 1990-х годах. Поскольку они имеют незначительную высоту и хорошо задернованы, авторы раскопок допускали, что некоторые обозначенные объекты могут оказаться естественными всхолмлениями.

В этих условиях, для прогноза расположения археологических объектов, относящихся к различным культурно-хронологическим комплексам, а также с целью определения границ памятника и стратегии последующих целенаправленных археологических раскопок, в мае 2010 года были выполнены геофизические исследования.

Для определения значений магнитной восприимчивости почвенного и подлежащего «материкового» слоев были использованы предварительно зачищенные вертикальные стенки двух старых раскопов, расположенных

рядом с участками, на которых планировалось провести геофизическую съемку. Анализ результатов измерений χ показывает в обоих случаях достаточно значительную контрастность магнитной восприимчивости между верхним (почвенным) слоем на глубине от 16 до 50 см и нижележащем (материковым) слоем. Эта контрастность составляет около 0,00025 ед.СИ, что вполне достаточно для генерации магнитных аномалий над археологическими объектами, источниками которых являются искусственные древние нарушения границ между этими слоями.

Учитывая результаты измерения магнитной восприимчивости, для исследования данного памятника был выбран метод высокоточной магнитометрии, который дает хорошие результаты для памятников с контрастными по магнитным параметрам грунтами. Картирование участков выполнялось последовательно, с севера на юг. Общая площадь геофизической съемки 11580 м^2.

После обработки полученной цифровой информации были построены магнитограммы исследованных участков (рис. 44). Общий фон характеризуется достаточно пестрой картиной хаотично расположенных неоднородностей, с положительными значениями до 3,5 нТл. Возможно, такая неоднородная картина связана с распашкой, которая предположительно производилась здесь в середине XX века.

Помимо курганов 18 и 31 точечные аномалии со значениями до 8,5 нТл фиксируются на месте насыпей 15, 33-35, 45 (участки 5-7). Во всех случаях они расположены среди скопления аномалий, идентифицированных как объекты эпохи ранней бронзы, и сходны с ними по своим основным параметрам. Вполне возможно, что на этих участках разновременные комплексы накладываются друг на друга. Отдельно следует отметить курган 44, расположенный на границе участков 6 и 7. В центре насыпи выделяются две крупных аномалии с положительными и отрицательными значениями, окруженные двойным кольцом более мелких положительных аномалий. Не типичная для магнитограммы центра кургана картина, возможно, указывает

на нарушения почвенных слоев. В настоящее время мы не можем сделать в отношении этих насыпей какой-либо определенный прогноз. Вполне вероятно, что результаты археологической проверки геофизических построений позволят, в перспективе, получить дополнительную информацию для интерпретации этих данных.

В 2010 г. для проверки и подтверждения полученных геофизических результатов на памятнике были проведены археологические исследования. В ходе проверки в двух точечных раскопах, общей площадью 76 м^2, были выявлены четыре захоронения елунинской культуры и ряд ям.

Таким образом, археолого-геофизические исследования позволили не только получить подробную магнитную карту могильника Телеутский Взвоз-I, но и подтвердить прогнозы о расположении объектов елунинской культуры археологическими раскопками. Результаты геофизических работ позволят, в дальнейшем, более обоснованно выбирать участки для дальнейших исследований.

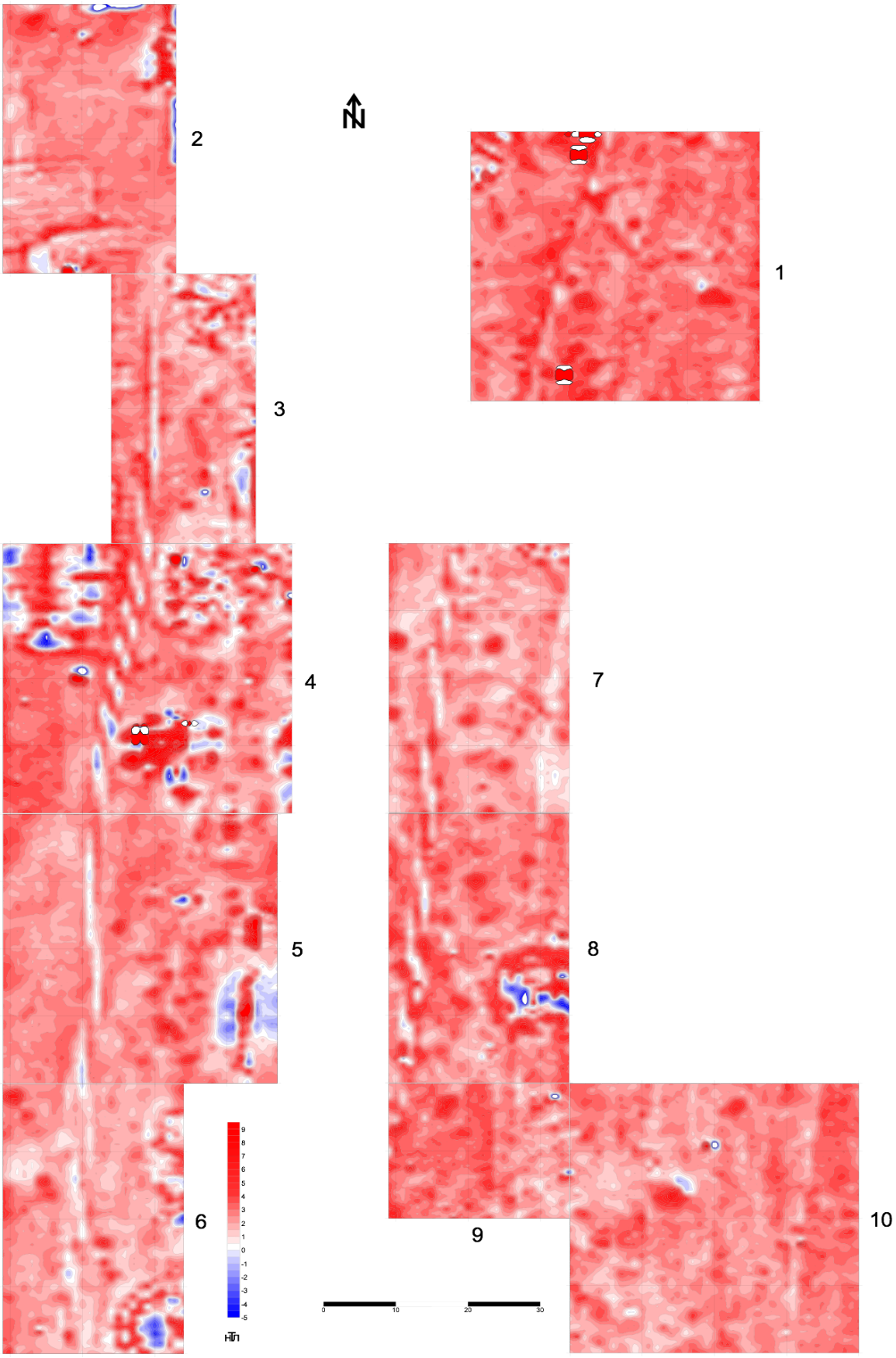


Рис. 44. Геомагнитная карта памятника Телеутский Взвоз-I

В 2010 г в рамках интеграционного проекта были проведены совместные российско-германские археолого-геофизические исследования нового курганного могильника древнетюркской эпохи ***Аул-Кошкуль-1***, обнаруженного в окрестностях одноименного села. Памятник расположен в озерной пойме. Визуально, до начала геофизических работ, на памятнике фиксировалось шесть объектов, которые можно считать погребальными комплексами. Четыре курганных насыпи (№№ 1-4) сгруппированы в цепочку, вытянутую по линии север-юг. К востоку от них расположены курганы №№ 5, 6. Благодаря рельефным признакам отчетливо выделяются надмогильные сооружения, порой усложненных конструкций с земляными площадками и ровиками. Таким образом, перед нами памятник, где даже без раскопок мы фиксируем различную архитектуру.

Для получения дополнительных сведений о границах распространения памятника, внутреннем устройстве насыпей и особенностях межкурганной территории решено было произвести геофизические исследования методом магнитометрии. Среди других геофизических методов магнитометрия представляет рентабельный инструмент для детальной картографии больших площадей в оптимальном режиме времени при условии достаточной контрастности грунтов и минимальной засоренности почвы железными предметами.

Площадь, разбитая на участки для магнитного сканирования, включала в себя все визуально фиксируемые насыпи (рис. 44). Последовательно было выполнено картирование восьми участков, размером 40×40 м^2. С западной стороны для получения более полной информации были добавлены дополнительные магнитометрические профили. Общая площадь геофизической съемки составила 13520 м^2.

Для достижения максимальной чувствительности и одновременно наивысшей скорости съемки была выбрана конфигурация «двойной сенсор» [Becker,1999. P.100-105]. Датчики были смонтированы на деревянной

раме и переносились на высоте 30 см. Профили наблюдений ориентированы с востока на запад для минимизации помех датчиков магнитометра.

Частота работы магнитометра 10 измерений в секунду позволяет измерить 40-метровый профиль наблюдений за 30 с, поддерживая разрешение 10-15 см при нормальной или быстрой ходьбе.

Дополнительно получена разница между измерениями двух магнитометрических датчиков и теоретически вычисленным средним значением геомагнитного поля. Разница амплитуд дает кажущиеся магнитные аномалии, вызванные магнитными параметрами археологических объектов, магнетизмом грунта и геологией. Для фильтрования микроколебаний магнитного поля Земли использован полосный фильтр магнитометра. Не менее 90% данных на 40-метровой сетке типичного археологического объекта имеют отклонения в пределах ± 5,0 нТл от скорректированного среднего значения геомагнитного поля. Почти все наиболее выраженные аномалии можно приписать к прокаленным структурам, железосодержащему шлаку или железному мусору. На месте прокалов, железные фрагменты и остатки обожженных кирпичей легко обнаружимы не только из-за разной направленности их магнитных диполей, но и благодаря высокой интенсивности аномалий (> ± 30,0 нТл).

Во время измерений 28 июня 2010 с 10:00 до 15:00 местного времени произошла магнитная буря. Магнитное поле Земли менялось на +/-5 нТл за менее чем 20 с. Эти вариации вызвали нерегулярные полосы на магнитограмме, которые не могут быть удалены вычитанием среднего значения по профилю или среднеквадратичного значения по сетке (рис. 5). Применение обеих этих процедур требуют постоянного увеличения или уменьшения магнитного поля во время измерения на профиле (т.е. 30 с) или на площадке 40 х 40 м^2 (т.е. 30 мин). Для решения этой проблемы к исходным данным были применены различные алгоритмы для облегчения зрительного распознавания и интерпретации, такие как выравнивающий процесс для

магнитограмм Geoplot (Geoscan Research Bradford, UK) и Archaeosurveyor (DWconsulting, The Netherlands).

Измерения магнитной восприимчивости выполнены аппаратурой “Magnetic Susceptibility Meter” (SM30 ZH-instruments, Czech Republic) на поверхности памятника и по образцам из разрушенного кургана №3. Результаты этих измерений позволяют лучше понимать магнитограммы и выполнить более детальную интерпретацию [Mullins, 1977. P. 223-246; Fassbinder, Stanjek, 1993. P. 129-140].

Среди образцов грунтов выделено 3 типа (таблица 2). Величина магнитной восприимчивости измерена на пяти образцах: желтая глина из материкового горизонта; черный, богатый органикой верхний почвенный слой; красная глина, скорее всего производная обожженных кирпичей или иного прокаленного материала.

Результаты измерения магнитной восприимчивости образцов грунта курганного могильника Аул-Кошкуль-1 приведены в таблице 2.

Таблица 2

	Типы образцов грунта	Магнитная восприимчивость, Каппа * 10-3 ед. СИ
1	Желтая глина (материк)	0, 059 – 0,107
2	Почвенный слой	0, 279 – 0, 743
3	Красная глина (прокал)	2, 50 – 4, 45

Для археологической интерпретации мы сравнили результаты топографии памятника с результатами магнитной разведки (рис. 45) в комбинации со значениями магнитной восприимчивости (табл. 2). После обработки полученной информации была построена магнитограмма исследованных участков, которая позволила подробно выделить и понять структуры внутри и/или ниже курганной насыпи.

В центральной и восточной части памятника на магнитограмме отчетливо прослеживаются параллельные линии, идущие в направлении север-юг, возможно, это связано со следами, оставленными сельскохозяйственной техникой во влажном грунте при покосах в засушливые годы. На месте визуально фиксируемых сооружений проявились аномалии с положительными магнитными значениями. Сооружения, отнесенные к первой группе, представлены округлыми магнитными аномалиями: диаметр аномалии кургана № 1 – около 10 м, кургана № 5 – около 7 м, кургана № 6 – около 14 м. Размеры аномалий сопоставимы с размерами визуально фиксируемых насыпей этих курганов. Особенности внутренней структуры этих насыпей не просматриваются, ровики отсутствуют. Аномалия сооружения № 6 неоднородна, восточная часть кургана характеризуется пониженными магнитными параметрами. Возможно это связано с распашкой восточной полы кургана. Отнесенное к этой же группе сооружение № 2 проявилось в виде аморфной аномалии, диаметром около 7 м, с отрицательными значениями. Вероятно, таким образом, проявилась насыпь кургана, сложенная из менее магнитного глинистого грунта без следов прокаленной почвы.

Сооружение № 3, разрушенное шурфом охотников и выделенное по своим конструктивным особенностям в отдельную группу, на магнитограмме проявилось только своей периферийной частью. По периметру сооружения проявилось кольцо отрицательных значений, шириной около 1,5 м. Область с внешней стороны этого кольца представлена зоной с положительными магнитными значениями. Ширина этой зоны в северной и северо-западной части около 1,5 м, в остальных сегментах она представляет собой расплывчатый контур. Очевидно, что эта аномалия связана со рвом.

На месте насыпи кургана № 4, также выделенного в отдельную группу, выделяется округлая аномалия с положительными значениями, диаметром около 8 м. В одном метре от нее, с внешней стороны фиксируется ров в виде

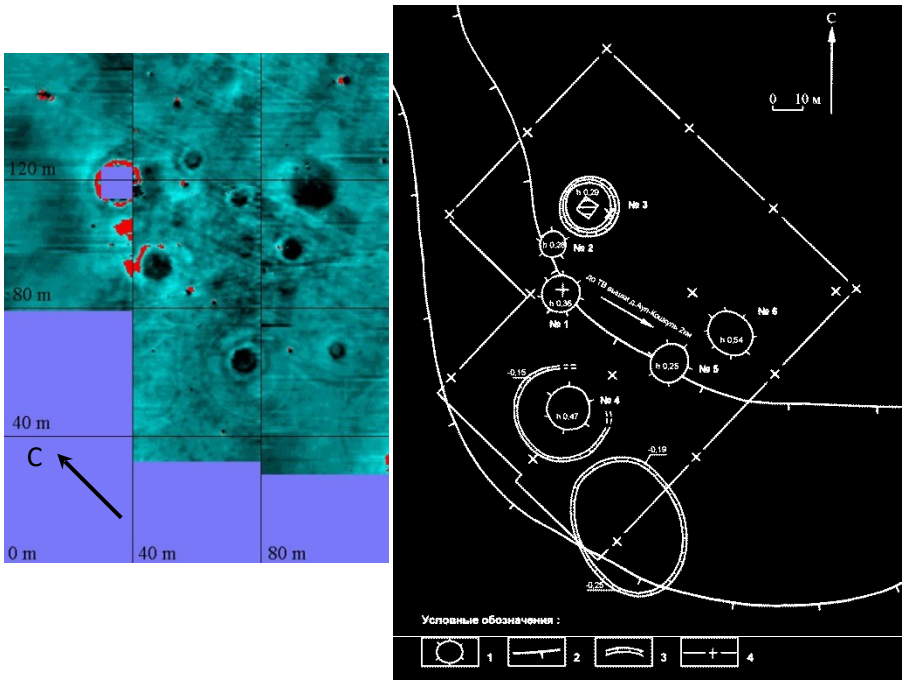
кольца с повышенными магнитными значениями, шириной около 1 м. Хорошо проявился ров ограничивающий площадку диаметром около 30 м.

На полученных в результате выполненной съемки магнитных картах проявились, визуально не зафиксированные объекты, которые заслуживают внимательного изучения и интерпретации. Отчетливо фиксируются три таких объекта. Вместе с курганом № 5 они представляют собой цепочку, вытянутую по линии север-юг. Она располагается между цепочкой курганов №№ 1-4 и одиночной курганной насыпью № 6. Объект № 7 находится на расстоянии около 30 м к юго-западу от кургана № 5, рядом с курганом № 4. На расстоянии около 9 м к западу от аномалии, вызванной объектом № 7, прослеживается фрагмент ровика, шириной около 1 м, который смыкается с ровиком кургана № 4. Объекты № 8, 9 находятся к северу от кургана № 5, расстояние между ними составляет 12-16 м. Аномалии №№ 7-9 близки по размерам (около 5 м в диаметре). Объекты №№ 7, 8 похожи на курганы группы 1, однако сооружение № 7 выделяется из этой группы наличием фрагмента ровика. Кроме того, в центре аномалии № 7, проявилась область более низких положительных значений, чем по периферии. Та же особенность фиксируется у кургана № 4 и объекта № 9. В свою очередь, объект № 9 имеет конструктивное сходство с курганами № 3 и № 4. На расстоянии около метра от вызванных этими насыпями аномалий прослеживаются округлые ровики, шириной около 1 м.

В пространстве между курганами №№ 1, 4 , 5, 8 фиксируются четыре округлых положительных магнитных аномалий, диаметром около 5-6 м. Вероятнее всего, это остатки курганов, которые были невысокими и могли быть распаханы, либо не имели рельефных признаков.

Таким образом, удалось построить подробную подповерхностную карту исследованного участка курганного могильника Аул-Кошкуль-1. Результаты оказались намного значительнее, чем ожидалось. Магнитограмма курганов показывает большое разнообразие в их конструкциях. Полученные результаты позволили прояснить картину внутреннего устройства курганных

насыпей и оценить особенности окружающего пространства, выявить объекты, не фиксируемые на дневной поверхности, что очень важно для определения стратегии археологических раскопок. Геофизическая разведка, по сути, стала превосходным и неразрушающим археологическим методом, неоценимым для представления и понимания структуры памятника в целом и отдельных объектов в частности, а также выработки правильной стратегии дальнейшего археологического исследования. Сравнение результатов археологических исследований с геофизическими картами позволит существенно дополнить уже имеющуюся методику археолого-геофизических исследований.



Целый ряд памятников был исследован в 2010 г. в Сузунском районе Новосибирской области. В 2010 г. проходил мониторинг и разведка археологических памятников, которые интенсивно разрушаются в этом районе как под воздействием природных, так и антропогенных факторов. Параллельно были выполнены геофизические исследования на нескольких курганных могильниках.

Электромагнитное частотное зондирование производилось на курганных могильниках ***Камышенка-1, Камышенка-3, Лесниковский-1***. На каждом из памятников исследовано по одному кургану. Общая площадь геофизических исследований составила 3725 м^2. Для каждого кургана получены 14 карт подповерхностного распределения кажущегося удельного сопротивления, соответствующие 14 рабочим частотам аппаратурно-программного комплекса ЭМС. Для описания данных, полученных с помощью аппаратуры ЭМС, для каждой площадки выбиралась наиболее показательная, характерная карта распределения удельной проводимости, несущая максимально детальную информацию о строении площадки.

Курганный могильник Камышенка-3 находится в 2,5 км к юго-востоку от с. Камышенка, в 600-800 м восточнее памятника Камышенка-1. Выявлен в 1968 г. А.П. Уманским. Состоит из девяти насыпей, диаметром 8-15 м [Троицкая, Молодин, Соболев, 1980, с. 104]. На геоэлектрической карте участка (45 х 45 м^2) на краю кургана № 3 памятника Камышенка 3 выделяется двойное ограждение, а в центре - грабительский шурф (рис. 46). Других очевидных аномалий выявить не удалось. Отсутствие могилы (аномалии) в данном кургане может быть объяснено тем, что погребение было совершено на уровне древнего горизонта. Соответственно, погребальная конструкция располагалась в насыпи кургана, и могла быть разрушена древними грабителями. Хорошо прослеженное двойное ограждение является, скорее всего, рвом окружающим курган.

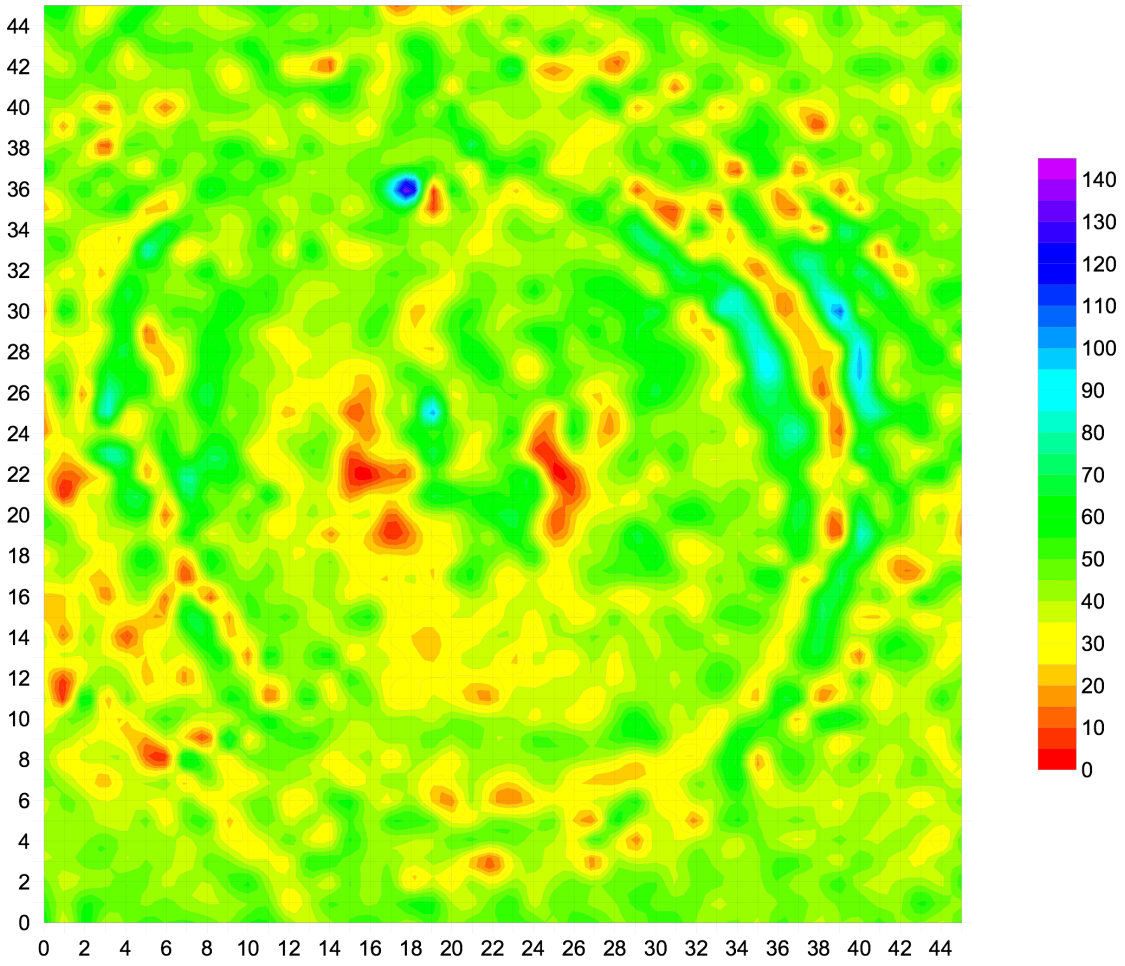


Рис. 46. Камышенка-3, курган № 3. Геоэлектрическая карта по данным ЧЗ, ЭМС, частота 5 кГц

В мае 2011 г. были произведены магнитометрические исследования курганной группы **Кармацкий**, расположенной на правом берегу р. Обь, в окрестностях одноименного поселка, в Первомайском районе Алтайского края. Общая площадь памятника составляет около 7000 м^2. Высота террасы, на которой располагаются объекты, около 20 м. Территория покрыта сосновым бором. Курганная группа Кармацкий является одним из самых крупных комплексов монгольского времени (XIII-XIV вв.) в Алтайском Приобье. Она состоит из 74 земляных курганов округлой и овальной формы, в основном небольших размеров (в диаметре от 2-3 до 8 м, высотой 0,1-0,7 м). Часть насыпей имеют западины, свидетельствующие об ограблении захоронений. В разные годы здесь были исследованы курганы №№ 1, 3-5, 8, 9, 69-71. Раскопанные курганы имели насыпи округлой, либо овальной формы, диаметром 5-8 м, высотой 0,15-0,7 м. Как правило, под насыпью

располагалось одно захоронение, только в кургане № 9 зафиксировано два. Ямы прямоугольной, либо овальной формы, размерами от 1,5×0,8 до 3,2×1,4 м, глубиной 0,3-0,5 м ориентированы по длинной осью линии ЮЗ-СВ или З-В. Для внутреннего устройства могильных ям характерно наличие деревянных конструкций и покрытий из бересты.

Материалы курганного могильника Кармацкий имеют ключевое значение для решения проблем изучения культуры населения предгорно-равнинной зоны Алтая периода развитого и, возможно, позднего средневековья. Он является одним из базовых комплексов недавно выделенной кармацкой культуры (XIII-XIV вв.), этапы которой отражают формирование и развитие новой общности в условиях монгольских завоеваний, образования и распада Золотой Орды. Причинами аварийного состояния курганов являются обрушение береговой кромки, сооружение глубоких противопожарных рвов (по краю и в глубине террасы), полевые дороги. Еще один фактор – произрастание деревьев, как на самих курганах, так и рядом с ними, которые своими корнями проникали в погребения. Могилы сооружены в песчаном грунте и располагаются неглубоко от современной поверхности. Этот фактор тоже оказывал негативное влияние на погребальный комплекс, усугубляя его аварийность. Большинство объектов находится в аварийном состоянии (устройство противопожарных рвов, вырубки леса, для которых проложены грунтовые дороги, ранее здесь располагалась пасека).

При раскопках курганов монгольского времени был обнаружен ряд объектов, связанных с культурным слоем поселения и с могильниками разных эпох. Таким образом, данный памятник представляет собой комплекс, состоящий из нескольких археологических объектов (курганная группа, грунтовые могильники, поселение, культовые объекты), которые относятся к различным историческим периодам и культурам (от эпохи бронзы до развитого средневековья).

В мае 2010 г. на памятнике Кармацкий были выполнены магнитометрические исследования (рис. 47). Сетка квадратов для магнитного картирования была разбита так, чтобы покрыть всю доступную часть памятника. В зону участков попали практически все выделенные на плане насыпи. Общая площадь геофизической съемки составила 5429 м^2, при этом общая площадь памятника составляет около 7000 м^2. Некоторые участки нельзя было исследовать из-за сильных перепадов рельефа и поваленных деревьев. Практически все участки были залесены. Следует отметить, что в подобных условиях именно вертикальное положение датчиков единственно возможный вариант для съемки.

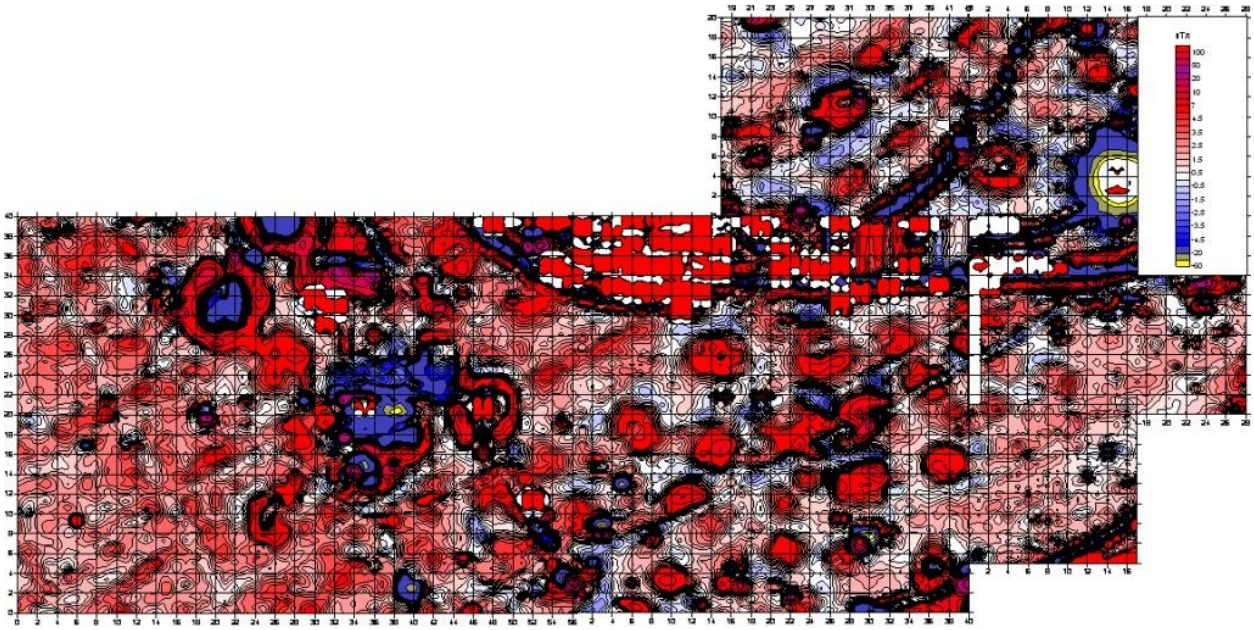


Рис. 47. Кармацкий. Магнитограмма.

Безинвентарные детские погребения обнаружены к северу и югу от насыпи 71. Предварительно они датируются первой половиной II тыс. н.э. Остатки древнего поселенческого слоя зафиксированы уже при раскопках кургана 1. Детские погребения за пределами насыпи зафиксированы рядом с курганами 8, 69. В результате работ, проведенных на памятнике Кармацкий, полностью изучено два средневековых кургана (№№ 8, 9), в раскопы которых попали 14 разновременных могил и остатки культурного слоя поселения.

В 2003 г. сплошным раскопом исследовались еще два кургана (№№ 69, 70). В ходе работ были зафиксированы и изучены три могилы [Тишкин, Горбунов, Дашковский, 2004, с. 481].

На участке частично распаханного кургана 12 могильника ***Тартас-2*** георадиолокационные исследования выполнялись по той же сети наблюдения, что и магниторазведочные измерения. Анализ отобранного к обработке материала и сопоставление его с магниторазведочными данными показал, что на радарограммах иногда возможно выделить в разрезе неоднородности, интерпретируемые как археологические объекты.

Рассмотрим результаты геофизических измерений по профилю 21, пересекающему курган в центральной части (рис. 48).

На графике вертикального градиента магнитного поля наиболее интенсивная аномалия проявилась в центральной части профиля (a). Исходя из опыта предыдущих работ, интерпретируется как центральное погребение. Слева и справа от нее отмечаются менее интенсивные минимумы (b), которые вероятно всего соответствуют рву вокруг кургана. Более четко кольцевая структура рва прослеживается на планах изолиний вертикального градиента магнитного поля. Рядом с аномалией центрального погребения на профиле 27 выделяется еще один локальный минимум ΔT неизвестной природы.

На радарограмме выделенные по данным магниторазведки объекты выделяются участками с повышенной амплитудой отраженных волн и низкочастотным типом записи. Для лучшей визуализации георадарных данных было применено преобразование Гильберта, после которого в разрезе четко вырисовываются три структуры, соответствующие центральному погребению и участкам рва. Оценочная глубина структур составляет 1,2-1,4 м при средней диэлектрической проницаемости разреза равной 12. Неопознанный объект на профиле 27 имеет значительно меньшую глубину, примерно 0,9 м. и пересекает могильник в центральной части.

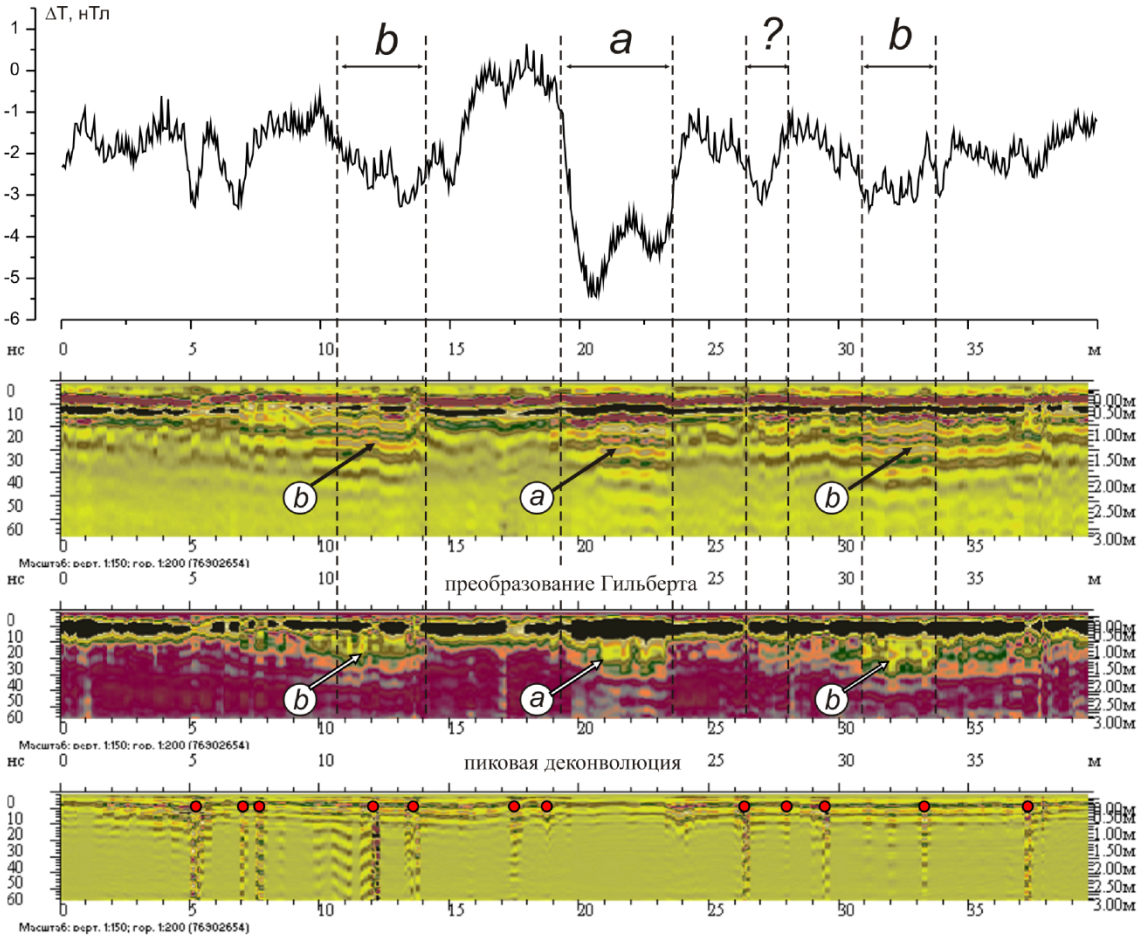


Рис. 48. Тартас-2, могильник № 12. Георадарограмма по профилю № 21

В результате обработки радарограммы методом пиковой деконволюции в верхней части разреза были выделены металлические предметы, отмечающиеся характерным типом «звенящего» сигнала. Почти все выделенные металлические объекты создают локальные аномалии градиента магнитного поля, которые четко видно на графике ΔT.

Таким образом, результаты геофизических исследований показали, что комплексный анализ магниторазведочных и георадиолокационных данных значительно повышает информативность методов и снижает неоднозначность трактовки. Полученный опыт комплексной интерпретации необходимо применять при археологических исследованиях и в дальнейшем.

В результате работ до начала раскопок были получены детальные геоэлектрические карты и разрезы подповерхностного размещения

археологических объектов. В отличие от данных магнитной съемки, такой метод позволил получить дополнительную информацию, позволяющую составить представление о глубинах залегания и структуре слоев. При исследовании жилищ оказалось возможным выделить области очагов, грунт, которых обладает пониженным сопротивлением и участки с повышенным сопротивлением внутри котлованов жилищ, связанных, с наиболее утоптанным плотным полом. Такие данные, дополненные результатами раскопок, позволяют точнее выделить в жилищах наиболее обитаемые зоны и места отдыха. Комплексные данные магнитометрии и электромагнитного сканирования на задернованных участках памятника позволили надежно идентифицировать археологические объекты и скорректировать границы раскопов.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИЗУЧЕНИЯ КУРГАННЫХ МОГИЛЬНИКОВ

Для грамотной реализации археолого-геофизической методики археологам необходимо иметь полевой каппаметр для измерения магнитной восприимчивости почв. С его помощью можно устанавливать зависимости и причины, влияющие на величину магнитных параметров. Вполне возможно сформировать базу данных по этому вопросу.

Особое внимание обращалось на выявление и оценку потенциальных возможностей магнитометрического метода при картировании и изучении курганных комплексов. Из нашего опыта предыдущих магнитометрических исследований курганов известно, что наряду с получением важной полезной информации имели место и некоторые отрицательные моменты, такие как повышенная интенсивность мешающих магнитных эффектов, обусловленных резкими изменениями рельефа местности в пределах курганных комплексов, наличие зарытых в земле магнитных железных объектов (лопаты, трубы, железные штыри), с помощью которых в современное время предпринимались попытки прощупывания или вскрытия курганов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За время выполнения работ по проекту получены новые геофизические данные о строении древних некрополей. Археологическая проверка на территории уникальных археологических памятников Западной Сибири подтвердила результаты геофизических исследований. Проведена интерпретация полевых данных; выполнены геофизические полевые работы и археологическая проверка на территории уникальных археологических памятников Западной Сибири.

Получены новые геофизические данные о строении древних некрополей. Археологическая проверка на территории уникальных археологических памятников Западной Сибири подтвердила результаты геофизических исследований. К отчету прилагается список опубликованных в ходе проекта работ и список конференций, на которых докладывались результаты исследований.