

## ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ ПРИ МОРСКИХ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЯХ

А. Н. Иваненко, Ю. В. Брусиловский, И. А. Веклич, А. М. Городницкий

*Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН,  
Россия, 117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36,  
e-mail: ivanenko.an@ocean.ru, brusilovsky.yv@ocean.ru*

В статье обобщен многолетний опыт по использованию гидромагнитной съемки при инженерно-геологических и экологических изысканиях, выполненных лабораторией геофизических полей ИО РАН им. П. П. Ширшова, в 2000–2020 гг. Высокоточная гидромагнитная съемка применялась для решения широкого спектра прикладных задач, таких как экологический мониторинг подводных скважин, инженерно-геологические работы под установку буровых платформ и под прокладку нефтегазопроводов, поиск техногенного мусора, а также мониторинговые обследования, гарантирующие безопасную эксплуатацию подводных магистральных трубопроводов. Показано, что эффективность метода достигается при соблюдении ряда требований к методике съемки. Наличие высокоточной навигационной системы, дающей необходимую точность привязки, и плотной сети ортогональных галсов, гарантированно обеспечивают определение пространственного положения устьев ликвидированных скважин и нахождение антропогенных объектов. Основным фактором повышения эффективности геофизических работ при картировании потенциально опасных геологических структур является комплексный подход. Рассмотрены возможности совместного применения гидромагнитной съемки и высокоразрешающей сейсморазведки. Это позволяет получить более достоверную картину распространения палеоструктур, тектонических нарушений и других потенциально опасных геологических образований. Показана качественная эволюция аппаратно-программных средств, используемых в ИО РАН при проведении прикладных магнитометрических работ и, соответственно, увеличение возможностей данного метода.

**Ключевые слова:** морская магнитная съемка, градиентометрия, инженерно-геологические изыскания, экологический мониторинг, палеоструктуры

### Введение

В данной статье обобщен опыт применения высокоточной гидромагнитной съемки, выполненной сотрудниками Лаборатории геофизических полей Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН для решения задач инженерно-геологических и экологических изысканий в период 2000–2020 гг.

Морская магнитометрия широко используется для обнаружения аномалий от подводных техногенных объектов, представляющих угрозу при бурении и строительстве на шельфе. Она помогает выявлять металлические объекты, разломы и скрытые структуры, обеспечивая безопасность подводных работ. Магнитометрия

также применяется для мониторинга ликвидированных скважин и подводных трубопроводов, что важно для экологической безопасности. Часто метод комбинируется с сейсморазведкой для повышения качества интерпретации данных и минимизации рисков при строительстве и эксплуатации подводной инфраструктуры (Кочетов, Шепелев, Челышев, 2023).

Активизация работ по освоению шельфовых месторождений углеводородов, начавшаяся в конце 1990-х – начале 2000-х гг., привела к резкому увеличению объемов инженерно-изыскательских работ. Геофизические исследования на шельфе, в рамках инженерно-геологических изысканий, проводятся на всех этапах работ и являются одной из первоочередных задач. Целью морских инженерно-геофизических работ является детальное картирование морского дна и выявление потенциально опасных природных и техногенных объектов, которые могут представлять опасность при проведении подводных строительных работ, при установке буровых платформ и при бурении, а также, что очень важно, при выполнении экологического мониторинга ликвидированных скважин, пробуренных на дне акваторий. Гидромагнитная съемка, наряду с другими геофизическими методами, широко используется в инженерно-геологических изысканиях для обнаружения и картирования магнитоактивных неоднородностей техногенного происхождения и потенциальных геологических опасностей. Такими потенциально опасными геологическими объектами могут быть: зоны трещиноватости и разрывные нарушения, скрытые под современными осадками, зоны моренных отложений, погребенные речные долины, подводные вулканы (в том числе – грязевые), палеодепрессии.

Лаборатория геофизических полей Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН на протяжении многих лет выполняет подобные инженерные и экологические работы. Гидромагнитная съемка использовалась для решения широкого круга инженерных задач, включая экологический мониторинг подводных скважин, работы по установке плавучих буровых платформ, инженерно-геологические изыскания под прокладку нефтегазопроводов и мониторинговые обследования, обеспечивающие безопасную эксплуатацию подводных магистральных трубопроводов. Работы выполнялись в различных акваториях на судах разного класса, и под каждую задачу в лаборатории адаптировалась методика магнитной съемки и обработки полученных данных. Ниже приводятся примеры развития и успешного использования разработанного в Лаборатории программно-методического комплекса «MATROS-IV» (Gorodnitsky et al., 2013; Пальшин и др., 2023), обеспечивающего полный цикл первичной обработки и последующей интерпретации морских геомагнитных данных. Материалы излагаются в хронологическом порядке и иллюстрируют качественную эволюцию аппаратно-программных средств, используемых в ИО РАН, и, соответственно, увеличение возможностей метода.

## Северный Каспий

В 2004 г. на научно-исследовательском судне (НИС) «Рифт» Институтом океанологии были выполнены геомагнитные градиентные измерения в составе комплексной экспедиции на Ялама-Самурском и Центральном поднятиях, а также в центральной части Каспийского моря, в Дербентской впадине. Эти поднятия Среднего Каспия считаются одними из наиболее перспективных нефтегазоносных районов (Глумов и др., 2004).

Магнитная съемка на обоих полигонах выполнялась в рамках проекта установки передвижных плавучих буровых установок (ППБУ), а также на профиле, соединяющем оба полигона. Измерения магнитного поля Земли (МПЗ) осуществлялись в градиентном варианте с использованием градиентометра ДПМ-2 разработки ИО РАН (Беляев, Филин, 1990).

На площадках съемка проводилась по системе ортогональных профилей с междугалсовым расстоянием 200 м на основных и 500 м на секущих контрольных галсах. На участках непосредственно под постановку ППБУ (на площади 200×200 м) сеть наблюдений сгущалась до 50×50 м. Глубина моря на полигоне «Ялама-Самур» составляла 400–450 м, а на полигоне «Центральный» – 450–500 м. Скорость судна была 5 узлов на первом полигоне и 8–9 узлов на втором.

Количество меридиональных профилей на полигоне «Ялама-Самур» составило 29, а широтных – 15; на полигоне «Центральный» количество субмеридиональных профилей было 15, а субширотных – 29. Общий объем магнитной съемки составил 355 км на площадке «Ялама-Самур», на площадке «Центральный» – 312 км.

Расстояние между датчиками магнитометра (база градиентометра), учитывая глубину моря, было выбрано 100 м, цикл измерений составлял 2 секунды (0.5 Гц). Для минимизации влияния судна на измерения магнитного поля (устранение девиации) буксировка датчиков осуществлялась на расстоянии 200 и 300 м соответственно. Это значительно превышает три длины судна «Рифт» ( $53.7 \times 3 = 161$  м), рекомендованные инструкцией по морской магнитной съемке (Гузевич и др., 1987).

Магнитная съемка на Ялама-Самурском участке проводилась при волнении моря 4–5 баллов, что, естественно, несколько увеличило ее зашумленность. После обработки данных с использованием пакета программ «MATROS-IV», включающего, помимо стандартных процедур первичной обработки, также интегрирование градиента и уравнивание галсов с помощью полиномов 1й степени, погрешность (СКО) съемки составила 0.61 нТл. При этом размах аномалии, представленной, в основном, низкочастотным субмеридиональным трендом, был равен 24 нТл.

После удаления билинейного тренда на участке Ялама-Самур была уверенно выделена локальная остаточная аномалия субмеридионального простирания, интенсивностью 8 нТл и шириной около 1.5 км. Оценка глубины залегания источников аномалии методом характерных точек дала значение 450 м, что соответствует верхней части осадочного чехла в районе исследований. Проведенный далее совместный анализ карты аномального магнитного поля и временных разрезов непрерывного

сейсмического профилирования (НСП) показал, что границы и простираание источников локальной аномалии совпадают с выделяемым в осадочной толще палеоуступом, который отмечает палеограницу шельфовой террасы. Эта область соответствует месту аккумуляции терригенно-осадочного материала и включает в себя участки с повышенным содержанием магнитных минералов.

Выявленная структура, наряду со структурами палеоврезов и палеодолин, представляет потенциальную опасность для установки плавучих буровых платформ и требует дополнительного изучения. Подобные геологические структуры часто заполнены слабо консолидированными, газонасыщенными осадками, включая крупно-обломочный материал (Меркулов, 2002). Поэтому по итогам комплексных геофизических работ была дана рекомендация о необходимости рассмотрения альтернативных мест для постановки ППБУ.

Эффективность применяемого градиентометрического метода и методики обработки была наглядно продемонстрирована при проведении магнитной съемки на структуре «Центральная», когда волнение моря не превышало 1–2 баллов. Здесь погрешность съемки после уравнивания галсов полиномом 1й степени составила всего 0.27 нТл. (Иваненко и др., 2012) при размахе аномалии 59 нТл. После исключения из синтезированного грида аномального магнитного поля (АМП) билинейного тренда, в центре полигона четко выделилась область отрицательного магнитного поля с амплитудой до 3 нТл. Подобные слабые локальные магнитные аномалии являются одним из признаков нефтеносности. Их создают приобретающие вторичную химическую намагниченность (под воздействием поднимающихся флюидов) магнитные минералы вдоль границ залежи (Березкин, Лощаков, Николаев, 1982). Проведенное ОАО «ЛУКОЙЛ» в 2008 г. бурение на выбранной площадке подтвердило наличие нефти (Богоявленский, 2009).

В период 2007–2008 гг. Институт океанологии по договору с ООО «ЛУКОЙЛ-Нижневолжскнефть» провел детальные работы на двух недавно открытых нефтегазовых месторождениях Северного Каспия: месторождении Ракушечное (площадка имени В. Филановского) и месторождении имени Ю. Корчагина. Эти работы выполнялись в рамках инженерно-геологических изысканий на трассе нефтепровода, пролегающей от месторождения имени Ю. Корчагина до площадки имени В. Филановского, а затем к берегу Калмыкии. Помимо этого были проведены изыскания на двух площадках для размещения буровых платформ.

Геоманитная съемка на площадках размером 1×1 км осуществлялась в градиентометрическом варианте по системе ортогонально расположенных галсов с межгалсовым интервалом 25 м. Геодезическая привязка выполнялась в дифференциальном режиме и обеспечивала точность определения местоположения судна не хуже 1 м. Для трасс под нефтепровод расстояние между галсами составляло 50 м.

Особенность проведенных работ состояла в том, что геометрические параметры полигонов создавали условия, затрудняющие учет горизонтальной анизотропии АМП поперек трасс: при протяженности 120 и 40 км их ширина была всего 1 км. Это потребовало разработки специальных методик обработки и увязки данных,

учитывающих выборочную пространственную неоднородность аномалий на длинных и коротких профилях. Методика включала разбивку трасс на перекрывающиеся участки со стационарными свойствами аномалий и их последовательное уравнивание, согласованный детрендинг соседних сегментов, гладкое «склеивание» гридов и т. п. В результате применения методик данные были очищены от вариаций и прочих помех и увязаны по уровню и линейному тренду. Высокое качество съемки позволило построить карты АМП с сечением изодинам 2 нТл при общем размахе аномалий вдоль трасс свыше 200 нТл. Применение усовершенствованного в процессе работ комплекса «MATROS-IV» на площадках 1×1 км дало возможность построить карты АМП с сечением изодинам 1 нТл (Брусилковский и др., 2009; Иваненко и др., 2012).

Для обнаружения и выделения потенциально опасных техногенных объектов применялись специализированные методы обработки и фильтрации данных: вычислялись градиенты и амплитуда аналитического сигнала, поля разделялись по частотам и глубинам до источников. Эти подходы позволили с высокой точностью идентифицировать локальные высокочастотные аномалии амплитудой в единицы нТл, связанные с приповерхностными (на глубине 10–20 м) источниками, и определять расположение объектов массой от десятков килограммов. Всего на трассах и площадках было установлено свыше 70 т. н. «контактов» – выявлено локальных магнитных аномалий от предполагаемых техногенных источников. Были выделены и идентифицированы десятки характерных локальных аномалий амплитудой от 5–7 до 40–50 нТл, создаваемых металлическими предметами массой от десятков до сотен кг. Большинство контактов совпадало с обнаруженными на записях гидролокатора бокового обзора (ГБО) предметами на дне типа якорей, цепей, тросов и т. п. В то же время на площадке Филановского и вдоль полосы шириной 1 км под трубопровод, после построения карт АМП и его градиентов, отчетливо проявились слабые (5–10 нТл) площадные аномалии, типичные для нефтегазоносных областей (Иваненко и др., 2012).

В районе площадки имени В. Филановского (ЛСП-1), немного к северо-востоку от нее, при заходе на съемочный галс была обнаружена аномалия интенсивностью свыше 2500 нТл при глубине до дна 10 м. Над объектом была проведена дополнительная детальная съемка (рисунки 1а, 1б), которая позволила картировать интенсивную локальную магнитную аномалию, по форме близкую к теоретической аномалии от вертикально намагниченного тела типа штока (монополю). Проведенные позже водолазные работы определили источник аномалии – им оказалась заглушенная буровая скважина, перекрытая железобетонным саркофагом.

Магнитные измерения на мелководье в Северном Каспии имеют свою специфику: работа ведется на достаточно крупных судах с малой осадкой, которые могут находиться в море несколько дней при штормовой погоде. Для уменьшения девиации судна при магнитных измерениях в этих условиях приходится применять длинные буксировочные кабели и использовать пенопластовые поплавки, увеличивающие плавучесть гондол градиентометра.

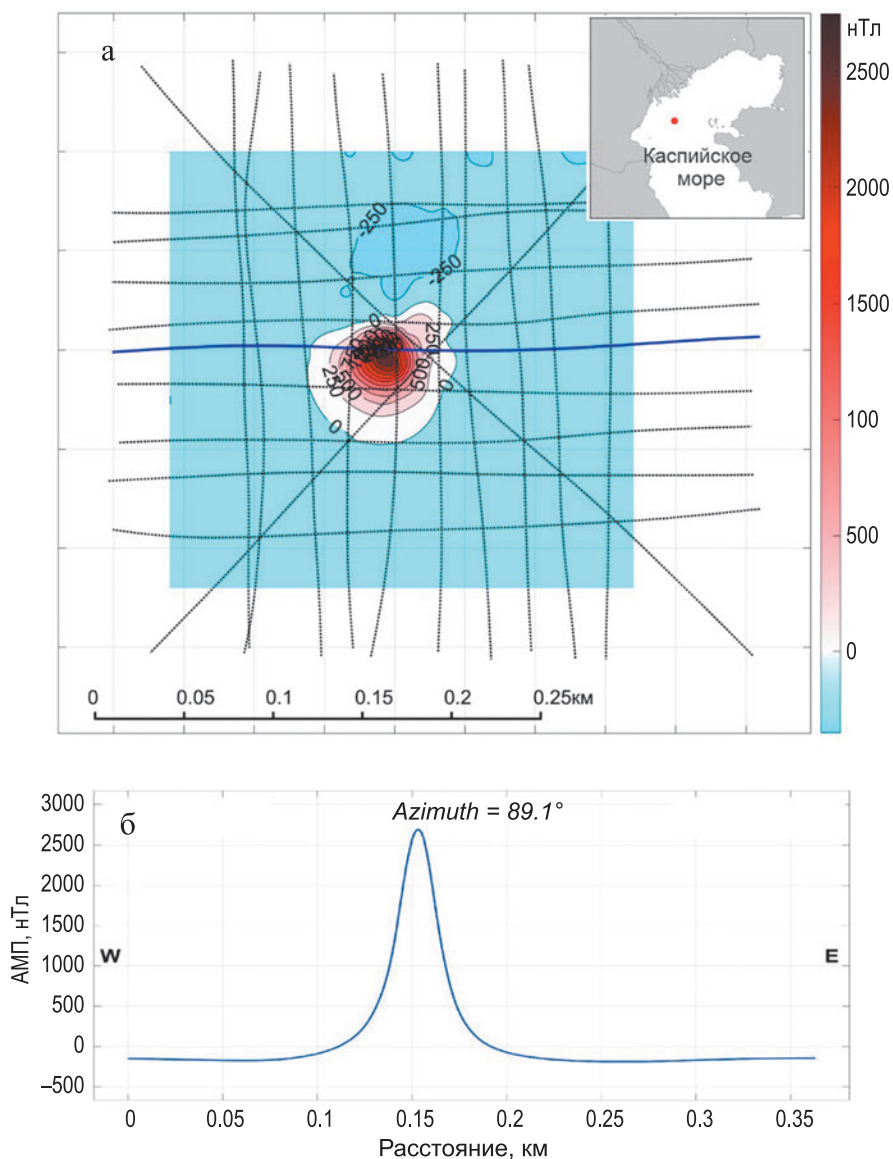


Рис. 1 – а) карта изодинам  $\Delta T$  над обнаруженной скважиной и профили съемки;  
б) аномалия от скважины на профиле, выделенном жирной линией

При выполнении указанных работ использовались различные гидрографические суда с разной осадкой, способные работать на отдельных участках многокилометровой трассы, вплоть до глубин 1.5 м. При этом очевидны трудности обработки магнитных данных, полученных в разное время и на различных судах. В ходе работ приходилось гибко менять параметры съемки и методики обработки, чтобы при фильтрации данных не подавить как высокочастотные магнитные аномалии, связанные с мелкими затопленными металлическими объектами, так и низкочастотные аномалии от залежей углеводородов.

Разработанная технология обработки и интерпретации морских магнитометрических данных позволяет интерактивно выполнять первичную обработку исходных данных (фильтрацию, разделение полей, увязку галсов) и в конечном результате

добиваться построения карт с предельно низким сечением изодинам (1–2 нТл). Эта технология также позволяет интерпретировать слабые аномалии (5–10 нТл), вызванные эффектами минерализации на контакте углеводородов с вмещающими породами, тем самым выделяя слабомагнитные структурные элементы осадочного чехла, которые мало заметны на картах наблюдаемых полей.

В ходе выполнения инженерно-поисковых работ на Каспии успешно развивалась разработанная, в том числе сотрудниками лаборатории, технология дифференциальной магнитометрии (Семевский, Аверкиев, Яроцкий, 2002). Эти результаты подробно изложены в монографии (Городницкий и др., 2004) и статьях (Иваненко и др., 2012) и (Gorodnitsky et al., 2013).

### **Байдарацкая губа Карского моря.**

#### **Подводная часть магистрального газопровода «Бованенково – Ухта» (2015 и 2016 гг.)**

Эксплуатация подводных магистральных трубопроводов (МТ) имеет определенную специфику, поскольку их надежность и безопасность должны обеспечиваться повышенными требованиями. Это вызвано особыми условиями, такими, как достаточно агрессивная морская среда, воздействие морского волнения, ветра и течений, заглубление в грунты, физико-механические характеристики которых могут изменяться в течение периода эксплуатации. В арктических условиях возникают дополнительные затруднения при реализации стандартного регламента мониторинга, обслуживания и ремонта МТ, связанные с длительным ледовым периодом. Для обеспечения безопасной эксплуатации подводных МТ требуются надежные средства, позволяющие в условиях арктического шельфа и короткой навигации эффективно проводить дистанционные мониторинговые обследования подводных МТ. Важную роль в решении подобных задач играют геофизические методы, в частности – морская магнитометрия.

Работы летом 2015 и 2016 гг. были организованы ФГБУ ГОИН по заказу Газпром ВНИИГАЗ и ставили задачу отработки технологии дистанционного определения пространственного положения подводной части МТ «Бованенково-Ухта» в Байдарацкой губе. Институт океанологии РАН был представлен отрядами магнитометрии и сейсмоакустики, которые решали задачу как можно более точного определения пространственного положения каждой из четырех линий трубопровода на отдельных подводных участках. Аппаратная часть магнитометрических работ обеспечивалась лабораторией квантовой магнитометрии УрФУ; в 2015 г. это были два морских градиентометра на ультракороткой (1 м) базе SeaPOS2, в 2016 – буксируемая надводная полноградиентная система SeaPOS4. Сейсмоакустические работы были необходимы ввиду заглубления труб МТ на несколько метров ниже уровня дна, они обеспечивались высокоразрешающим сейсмопрофилографом SES. Работы также проводились посредством высокоточной навигационной системы, функционирующей в

дифференциальном режиме. В 2015 г. велись в основном эксперименты по отработке аппаратно-программных средств и технологий, обеспечивающих высокоточное определение пространственного положения ниток МТ по магнитным аномалиям.

Магнитная съемка в 2016 г. велась с использованием разработанной в сотрудничестве с УрФУ полноградиентной многоканальной магнитометрической системы SeaPOS4, позволяющей одновременно с модулем вектора магнитного поля Земли измерять модуль его полного градиента – «аналитический сигнал». Подобная система для задач мониторинга подводных МТ в отечественной практике применялась впервые. Датчики этой системы размещались в вершинах жестко закрепленной немагнитной конструкции, имеющей форму, приближенную к тетраэдру, и установленной на немагнитном буксируемом плавучем носителе. На носителе также были размещены приемная антенна JavadGrAntG3T высокоточной навигационной системы JavadSigma, функционировавшей в режиме RTK (кинематика реального времени), и радиоантенна для приема дифференциальных поправок (рисунок 2) (Иваненко, Архипов, Сапунов, 2018).



Рис. 2 – Общий вид многоканального магнитометрического и навигационного комплекса (Иваненко, Архипов, Сапунов, 2018)

Исследования проводились на нескольких полигонах вдоль всего трубопровода при глубинах до дна от 8 до 27 м. При съемке с катера межгалсовое расстояние



уменьшалось до 5 м, тогда как при работе с судна на основных галсах, ориентированных поперек трубопровода, оно в среднем составляло 20 м. Такие параметры съемки обеспечивали достоверное картирование магнитных аномалий и аналитического сигнала от трубопровода. Для нескольких плотно покрытых съемкой участков были синтезированы карты АМП и измеренного аналитического сигнала, что позволило провести 3D интерпретацию полученных материалов.

Анализ полученных данных показал, что магнитные аномалии над газопроводом характеризуются классической одномодальной симметричной формой без выраженных сопряженных экстремумов. В местах слияния оснований аномалий их максимумы четко разграничиваются в аналитическом сигнале. Эти аномалии демонстрируют высокую степень корреляции между профилями в северо-восточном направлении, точно отображая расположение ниток газопровода в плане (рисунки 3, 4).

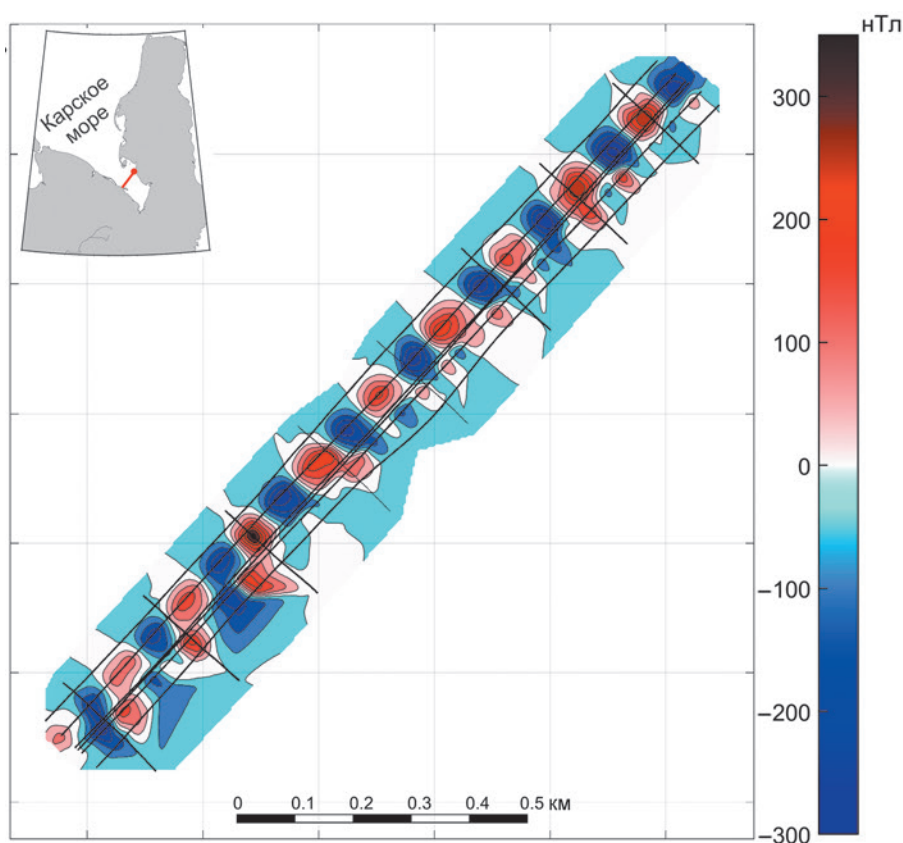


Рис. 3 – Карта локальных аномалий  $\Delta T$  на полигоне у Ямальского берега. На врезке – трасса трубопровода и полигон работ (Иваненко, Архипов, Сапунов, 2018)

Однако уже на первом полигоне, после построения карт АМП, было установлено, что аномалии над трубами носят площадной характер. Иными словами, они не являются строго линейными, а представляют собой цепочки знакопеременных квазиизометричных аномалий (рисунок 3).

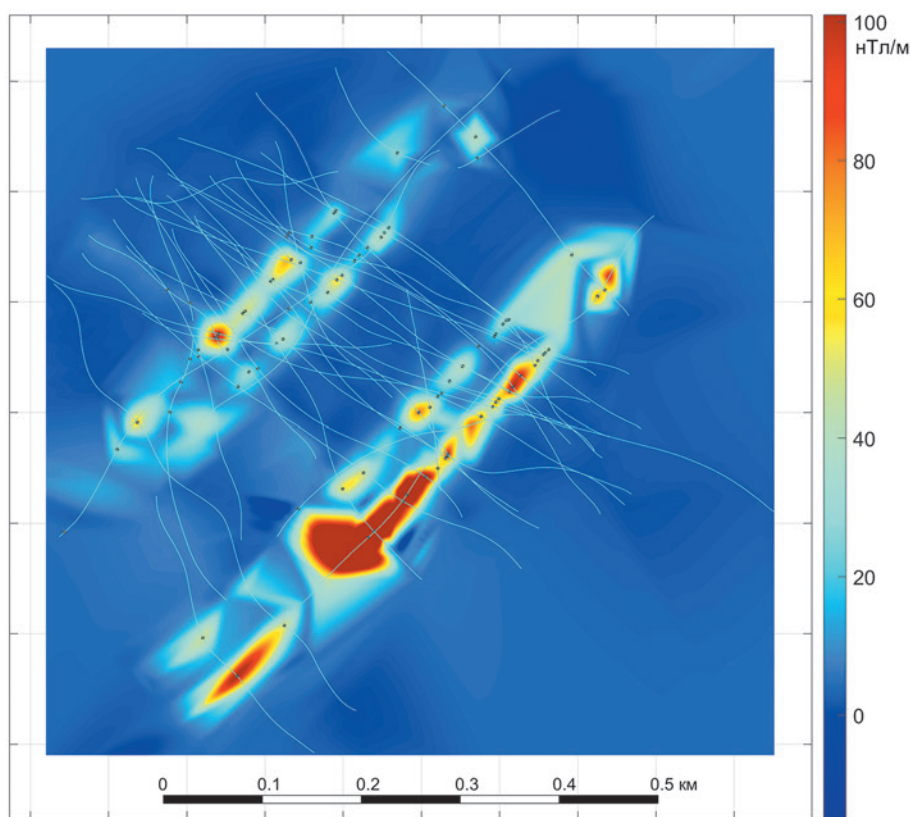


Рис. 4 – Карта измеренного аналитического сигнала над трубами, построенная по результатам съемки с буксировкой измерительного комплекса за катером. Светло-голубые линии обозначают маршрут движения измерительной системы, черные точки – положение источников аномалий, автоматически рассчитанное для каждого профиля съемки (начальное приближение для полной 3D инверсии аналитического сигнала)

Поэтому для качественного решения поставленной задачи необходимо было применять площадную высокоточную съемку с детальным картированием аномалий и выполнять расчеты в трехмерном варианте.

Стандартный подход к морской магнитной съемке, предполагающий покрытие площади регулярной равномерной сетью ортогональных галсов, в данном случае оказывается экономически неэффективным – общая длина подводной части МТ достигает 57 км. Поэтому покрытие площади четырех ниток газопровода съемкой с межпрофильным шагом 20 м потребовало бы пройти с измерениями почти 4000 погонных км. Учитывая невысокую скорость буксировки надводной системы (до 4 узлов) и необходимость частого (один раз в несколько часов для смены аккумуляторов) регламентного обслуживания магнитометрической и навигационной аппаратуры на плавучем носителе, временные затраты на картирование всей трассы составили бы не менее 30 суток. Использование преимуществ полноградиентной многоканальной магнитометрической системы позволило на порядок сократить эти затраты. Для прямого картирования аналитического сигнала вдоль трубопровода оказалось достаточно прохождения шести параллельных галсов вдоль каждой пары труб, дополняя их

контрольными поперечными секущими через каждые 100–200 м (Иваненко, Архипов, Сапунов, 2018).

Первичная обработка данных магнитной съемки осуществлялась в дифференциальном режиме для каждой пары датчиков с использованием технологии, разработанной в Институте океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Городницкий и др., 2004; Иваненко и др., 2012; Иваненко, Архипов, Сапунов, 2018; Пальшин и др., 2023).

Анализ площадных магнитных аномалий над трубопроводом показал их высокую однородность по форме и типу источника и, вследствие этого, хорошую аппроксимацию узким классом модельных тел. Подобные характеристики эквивалентных источников для сегментов трубы свидетельствуют о простой природе ее намагниченности, которая в основном носит остаточный характер. В этом случае основные аномалии формируются в области стыков отдельных труб, выступающих в роли элементарных полюсов или магнитов.

Таким образом, в ходе работ над МТ, проведенных в 2015–2016 гг. в Байдарацкой губе, был разработан и испытан прототип полноградиентной многоканальной магнитометрической системы SeaPOS4, интегрированной с высокоточной навигационной системой, функционирующей в режиме РТК. Система позволяет осуществлять детальное картирование магнитных аномалий и их градиентов в морской среде на небольших глубинах. При соответствующей доработке она может использоваться для дистанционного мониторинга положения подводных заглубленных трубопроводов и других инфраструктурных объектов с высокой точностью и относительно низкими затратами. Использование данной системы в сочетании с разработанными методическими и программными средствами позволяет надежно картировать, идентифицировать и интерпретировать магнитные аномалии, создаваемые сегментами труб и другими железосодержащими объектами. Это, в свою очередь, обеспечивает определение пространственного положения таких объектов с требуемой точностью.

Подробное описание технологии и методики проведения полноградиентной многоканальной магнитометрической съемки представлено в статье (Иваненко, Архипов, Сапунов, 2018).

### **Геофизический мониторинг на арктическом континентальном шельфе**

В целях прогнозирования климатических изменений и опасных природных процессов на арктическом континентальном шельфе России, а также для предотвращения и минимизации последствий возможных природных и техногенных катастроф, 26 июня 2015 г. была утверждена программа Экспертного совета по Арктике и Антарктике при Совете Федерации Федерального Собрания Российской Федерации. В рамках данной программы предусмотрено проведение геоэкологического мониторинга (Колюбакин и др., 2016).

Институт океанологии с 2000 г. ведет систематические научные исследования, направленные на геолого-геоморфологический мониторинг арктического шельфа.

В 2018 г., в ходе 38-го рейса НИС «Академик Николай Страхов», сотрудники Лаборатории геофизических полей провели магнитную съемку в акватории Печорского моря. Съемка велась в одноканальном режиме с помощью морского протонного магнитометра-градиентометра МПМГ-4 производства ООО «Импеданс», используемого лабораторией в середине 2010-х годов. Основной задачей группы магнитометрии было картирование верхнего слоя осадочного чехла, включая зоны распространения моренных отложений.

По данным съемки на полигоне в Печорском море была построена карта аномального магнитного поля (рисунок 5), а также определено положение приповерхностных источников локальных магнитных аномалий (рисунок 6) (Брусилковский, Иваненко, 2019).

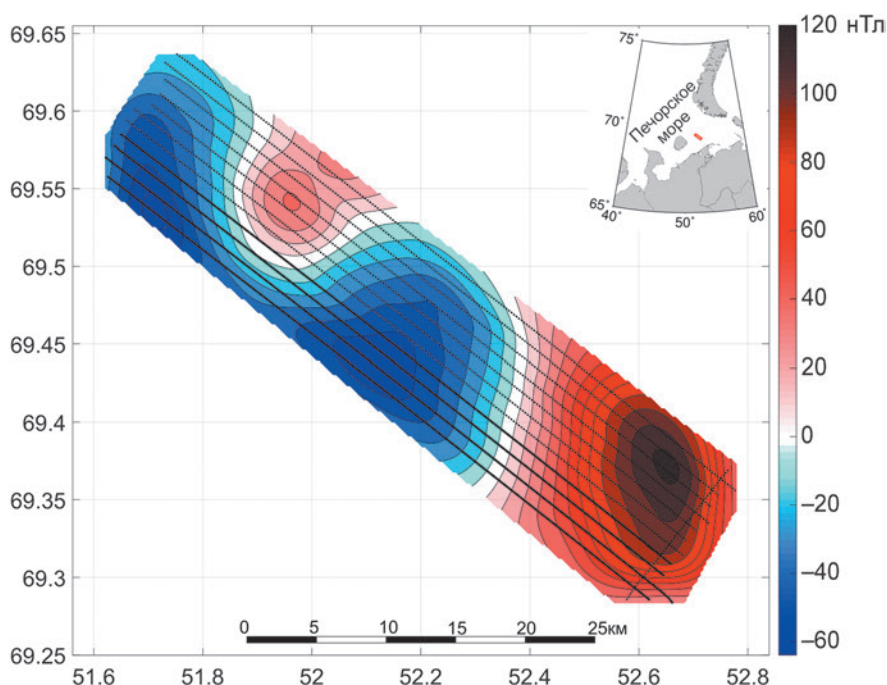


Рис. 5 – Карта изодинам аномального магнитного поля (Брусилковский, Иваненко, 2019).

Номерами отмечены профили с рис. 6, для которых найдено положение источников высокочастотных аномалий

Для картирования источников магнитных аномалий в верхней части осадочного чехла авторы применили методику спектрального разделения АМП на составляющие, каждая из которых соответствует определенному глубинному диапазону источников. Для каждого из этих диапазонов затем решалась обратная задача. В качестве естественных глубинных границ залегания верхних и нижних кромок источников аномалий использовались временные разрезы, полученные методом непрерывного сейсмического профилирования.

На рисунке 6 представлены результаты решения обратной задачи методом деконволюции Эйлера для высокочастотной составляющей магнитного поля, соответствующей верхней части разреза на глубинах 35–70 м. На рисунке четко

прослеживается корреляция плотности распределения источников аномального поля между профилями. Максимальная концентрация источников зафиксирована в областях положительных форм рельефа высотой 5–10 м, которые последовательно прослеживаются от профиля к профилю и представляют собой аккумулятивные образования.

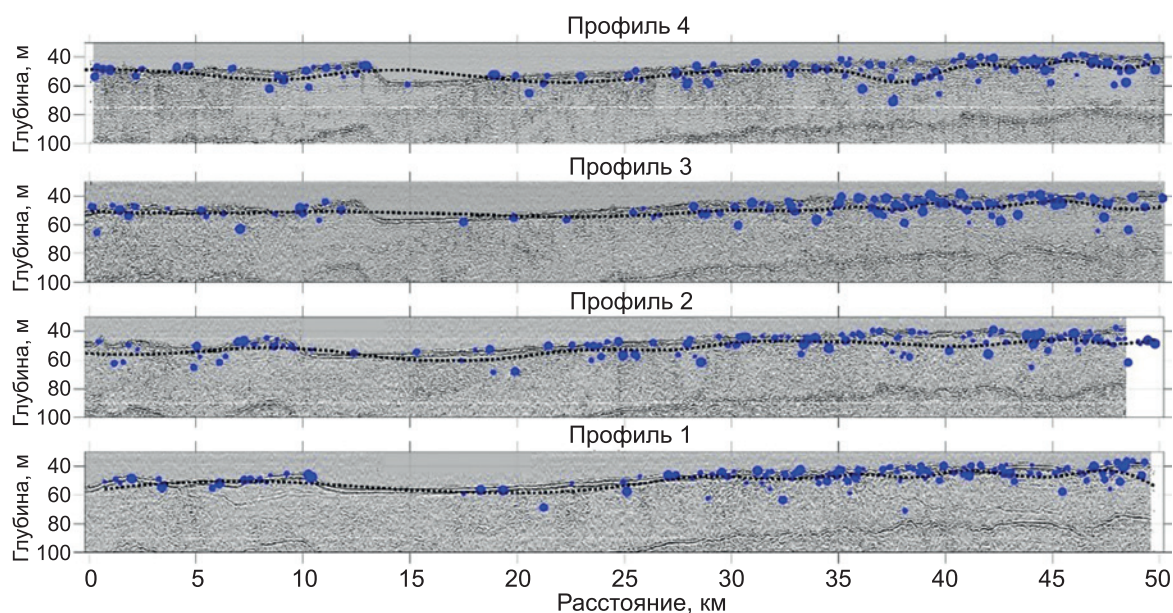


Рис. 6 – Положение источников высокочастотных аномалий МП для профилей 1–4: пунктир – средний уровень залегания источников аномалий (диполи), синие кружки – источники аномалий, размеры пропорциональны дипольному моменту источников в диапазоне от 0.1 до  $6.3 \times 10^{-4}$  А·м<sup>2</sup> (Брусиловский, Иваненко, 2019)

Таким образом, источники АМП, локализованные на глубинах 35–55 м и приуроченные к положительным формам рельефа, обозначают положение моренных гряд, сформировавшихся, вероятно, в ходе одной из стадий позднеплейстоценового (валдайского) оледенения. В то же время источники с более высоким дипольным магнитным моментом, расположенные в нижней части выделенного уровня на глубинах 55–70 м, могут указывать на моренные отложения, относящиеся к более ранним плейстоценовым оледенениям, которые развивались унаследовано (Брусиловский, Иваненко, 2019).

### Магнитная съемка над затопленным судном «Сакко и Ванцетти»

В мае 2019 г. на базе Южного отделения ИО РАН в Геленджике были проведены морские испытания магнитометра G-882 разработки фирмы «Geometrics» (США) (<https://www.geometrics.com/product/g-882-marine-magnetometer/>) с борта НИС «Ашамба». В качестве тестового объекта было выбрано затонувшее у берегов Северного Кавказа судно, местоположение которого было известно и нанесено на гидрографическую карту.

Сухогруз «Сакко и Ванцетти» водоизмещением 1200 т затонул 15 апреля 1943 г. при выходе из Геленджикской бухты, подорвавшись на донной мине в точке с координатами 44°30' с. ш., 38°01' в. д. Корпус судна раскололся на две части: носовая часть находится на глубине 38 м и отделена от кормы, расположенной на глубине 40 м, на расстояние 500 м к юго-западу. В настоящее время обломки корабля являются популярным местом погружений аквалангистов-любителей (<http://www.issledovateli.listbb.ru/viewtopic.php?f=139&t=1438>).

В указанных координатах была проведена гидромагнитная съемка с использованием магнитометра G-882, включающая 21 галс, каждый длиной в среднем 500 м, и покрывающая предполагаемые места затопления фрагментов судна. Отсутствие авторулевого на НИС «Ашамба» отразилось на нерегулярности и непрямолинейности галсов, из-за чего некоторые профили пришлось проходить повторно. Однако это не помешало успешно обработать данные с помощью программного комплекса «MATROS-IV» и получить качественные результаты, что очевидно из приводимой карты АМП (рисунок 7).

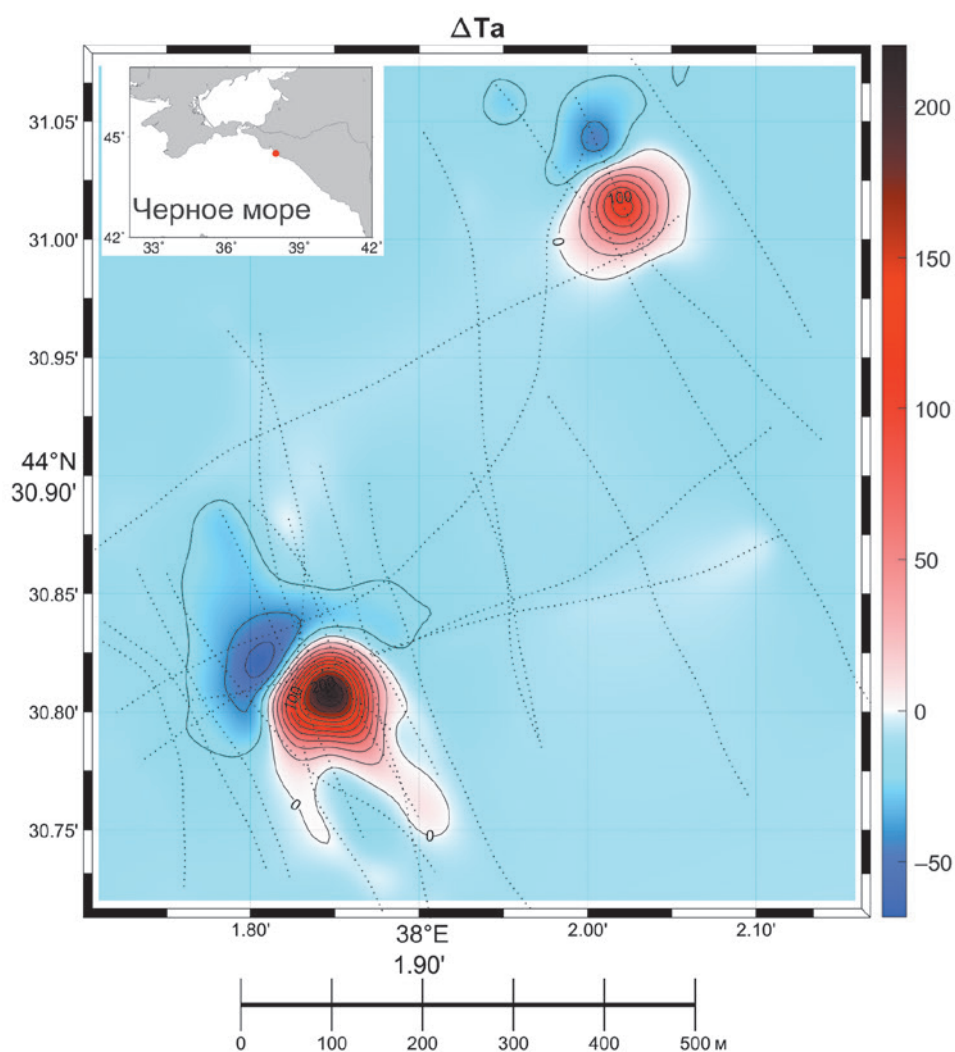


Рис. 7 – Карта изодинам АМП в районе затопления судна «Сакко и Ванцетти». Черными пунктирными линиями отмечены галсы магнитной съемки

Затопленные части судна отчетливо проявляются на карте АМП в виде квазидипольных аномалий. Для носовой части размах аномалии составляет 150 нТл, а для кормовой – 280 нТл. Аномалия от кормовой части осложнена в южной части слабовыраженными вытянутыми «языками», направленными на юг, а ее ось ориентирована на северо-запад. Это свидетельствует о двух факторах. Во-первых, вероятно, к югу от кормы сухогруза находятся относительно небольшие металлические предметы, такие, как якорные цепи, троса, обломки такелажа или фрагменты корпуса. Во-вторых, корпус судна сохраняет остаточную намагниченность. Если бы намагниченность была исключительно индуктивной, ось диполя была бы направлена почти строго на север.

Согласно табличным расчетам (см., например, Sea Spy Technical Application Guide, 2002), судно массой 1000 т на расстоянии 40 м должно создавать аномалию примерно 300 нТл, что и наблюдается в нашем случае. Поэтому можно сделать заключение, что основные массивные металлические части корабля, такие, как машина и механизмы, не подверглись значительной коррозии и сохранили свою остаточную намагниченность.

Наличие четкой и изолированной магнитной аномалии над носовой частью судна «Сакко и Ванцетти» позволило протестировать алгоритмы автоматического определения глубины источников аномалий. На рисунке 8а представлен результат расчета глубины до модельного диполя по локальному фрагменту карты аналитического сигнала. Определения глубины с использованием метода площадного анализа аналитического сигнала (Иваненко, Архипов, Сапунов, 2018) и классическим спектральным способом совпали в пределах 0.5 м. Метод аналитического сигнала дал глубину 31.8 м, а затухание логарифма, нормированного на частоту радиально осредненного спектра аномалии, показало глубину 32.3 м.

Согласно отчетам аквалангистов, погружавшихся возле носовой части судна, палуба начинается на глубине 30 м. Поэтому из нашей оценки следует, что магнитные массы носовой части судна расположены ближе к верхней части конструкции, чем ко дну. Вероятно, это могут быть кнехты, стрелы или якоря.

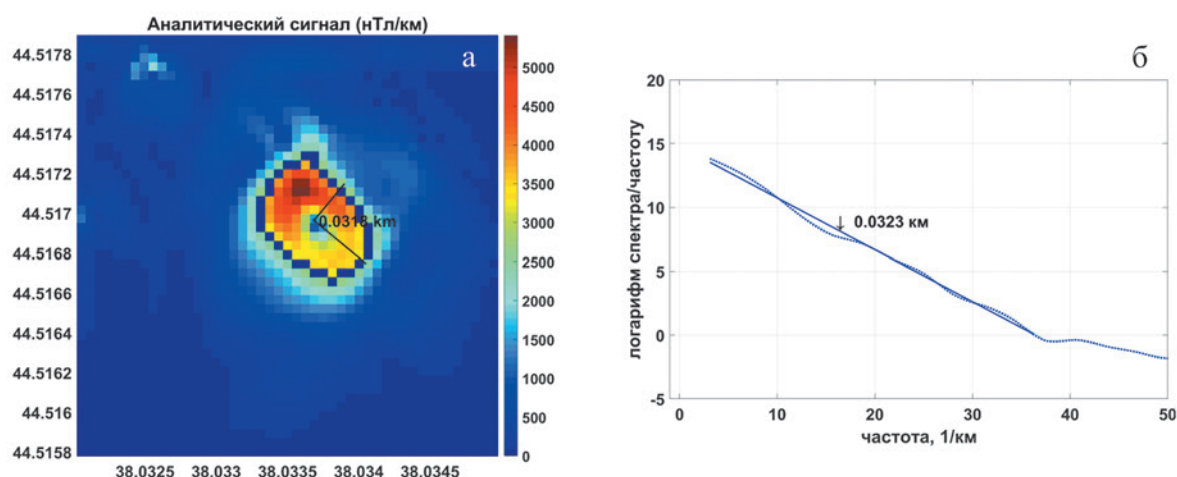


Рис. 8 – Определение глубины до центра эквивалентного диполя: а) по площади сечения аномальной области на карте аналитического сигнала; б) по затуханию логарифма радиально осредненного спектра, нормированного на частоту

Наличие такого удобного для обследований объекта, как затонувшее судно «Сакко и Ванцетти», вблизи базы Южного отделения ИО РАН создает благоприятные условия для проверки приборов, отработки технологий съемки и методов интерпретации. Это место представляет собой уникальный полигон для морских геофизических испытаний.

### **Геофизические исследования нефтяного месторождения Глубокое на Керченско-Таманском шельфе Черного моря**

Осенью 2019 г. на кромке шельфа в северо-восточной части Черного моря были проведены инженерно-геофизические исследования в рамках подготовки к установке буровых платформ. Работы выполнялись на двух полигонах размером 1×1 км и были направлены на изучение верхней части осадочного чехла. В комплекс исследований входили непрерывное сейсмическое профилирование (НСП) и высокоразрешающая сейморазведка методом отраженных волн общей глубинной точки (ВРС МОВ ОГТ). Помимо сейморазведочных работ проводилась детальная морская магнитная съемка. Основными задачами группы морской магнитометрии являлись обнаружение и локализация возможных техногенных объектов, картирование неоднородностей в верхнем слое осадочного чехла, а также выявление зон трещиноватости и геологических разрывных нарушений.

Магнитная съемка на полигонах выполнялась с использованием цезиевого морского магнитометра G-882. Работы проводились по системе параллельных галсов с межпрофильным расстоянием 15 м при скорости 4.5–5 узлов. Контрольные галсы прокладывались с интервалом 30 м. Буксировка прибора осуществлялась за центр тяжести гондолы, что позволяло удерживать его на глубине 25–30 м при таком скоростном режиме. Длина выпускаемого кабеля составляла 267 м, что было близко к максимально возможной конфигурации данной измерительной системы. С учетом глубины до дна на полигонах (80–100 м) прибор находился на расстоянии 55–70 м от возможных техногенных объектов, залегающих на дне. Высокая чувствительность датчика (не менее 0.004 нТл) и качество записи на профилях (случайная ошибка не превышала 0.05–0.1 нТл) позволили уверенно выделять на профилях локальные магнитные аномалии амплитудой до 0.2–0.3 нТл.

Используемая в комплексе «MATROS-IV» технология косвенного учета геомагнитных вариаций для полигонных съемок позволила практически полностью исключить временные вариации из данных, что обеспечило возможность интерпретации площадных аномалий предельно малой амплитуды – от 0.5 нТл. Оптимальное сочетание параметров съемки позволило надежно идентифицировать аномалии, вызванные техногенными объектами с массой железа от нескольких сотен килограммов и выше.

Исследования проводились для выявления потенциально опасных участков, предназначенных для установки плавучих буровых платформ. К таким участкам



относятся разломные зоны, погребенные речные долины, палеоврезы и локальные скопления газа. Методы выделения подобных зон, основанные на анализе и комплексной интерпретации магнитных и сейсмических данных, подробно рассмотрены в работе (Иваненко и др., 2020).

Специальная обработка данных позволила выявить многочисленные слабые локальные магнитные аномалии с амплитудой от 0.5 нТл. Часть из них может иметь техногенное происхождение, однако связана со слабوماгнитными объектами.

Другим источником магнитных аномалий являются геологические неоднородности в верхней части осадочного чехла. Эти неоднородности широко распространены в пределах изучаемой территории и, вероятно, обусловлены локальными изменениями литологического состава и миграцией флюидов. Нефтегазовые залежи в магнитном поле зачастую выражаются низкоамплитудными аномалиями характерной формы – слабым минимумом, окруженным рядом локальных максимумов. Подобная форма аномалий объясняется процессом вторичного химического формирования магнитных минералов, возникающего под влиянием миграции углеводородных флюидов вдоль субвертикальных зон в осадочной толще. Эти зоны, как правило, приуроченные к периферии залежи, тогда как в ее центральной части миграция углеводородов происходит на меньших глубинах (Березкин, Лошаков, Николаев, 1982; Чернов, Колесов, 2004). В результате данного процесса формируются характерные слабые локальные магнитные аномалии (Иваненко и др., 2012, 2020).

На рисунке 9 представлен фрагмент временного разреза ВРС-МОГТ, положение которого совпадает с профилем магнитной съемки, на котором были выявлены аномальные объекты А и В в пределах полигона 1. На разрезе отчетливо прослеживается связь источников магнитных аномалий с разрывными нарушениями, по которым происходит миграция углеводородных флюидов. Этот процесс приводит к вторичной минерализации осадочной толщи, что, в свою очередь, повышает ее магнитные свойства за счет формирования химической намагниченности (Иваненко и др., 2020).

Комплексная интерпретация материалов магнитометрии и сейсмоакустики позволила на исследуемых участках выявить наличие неблагоприятных и потенциально опасных для инженерного строительства элементов геологического разреза, в первую очередь – разрывные нарушения и газонасыщенные осадки. Все эти факторы, представляющие собой потенциальную опасность, необходимо учитывать при проектировании инженерных сооружений и строительстве. Такие геологические особенности могут создавать риски при возведении инженерных сооружений, поэтому их необходимо принимать во внимание еще на этапе планирования.

Летом 2020 г. в ходе бурения на одной из площадок в пределах потенциально опасной области, выделенной по данным магнитной съемки, был вскрыт газонасыщенный карман (устное сообщение А. В. Хортова).

Подробное описание методики магнитной и сейсмической съемок, а также обработки результатов и интерпретации, представлено в работах (Иваненко и др., 2020; Головинский, Хортов, 2004).

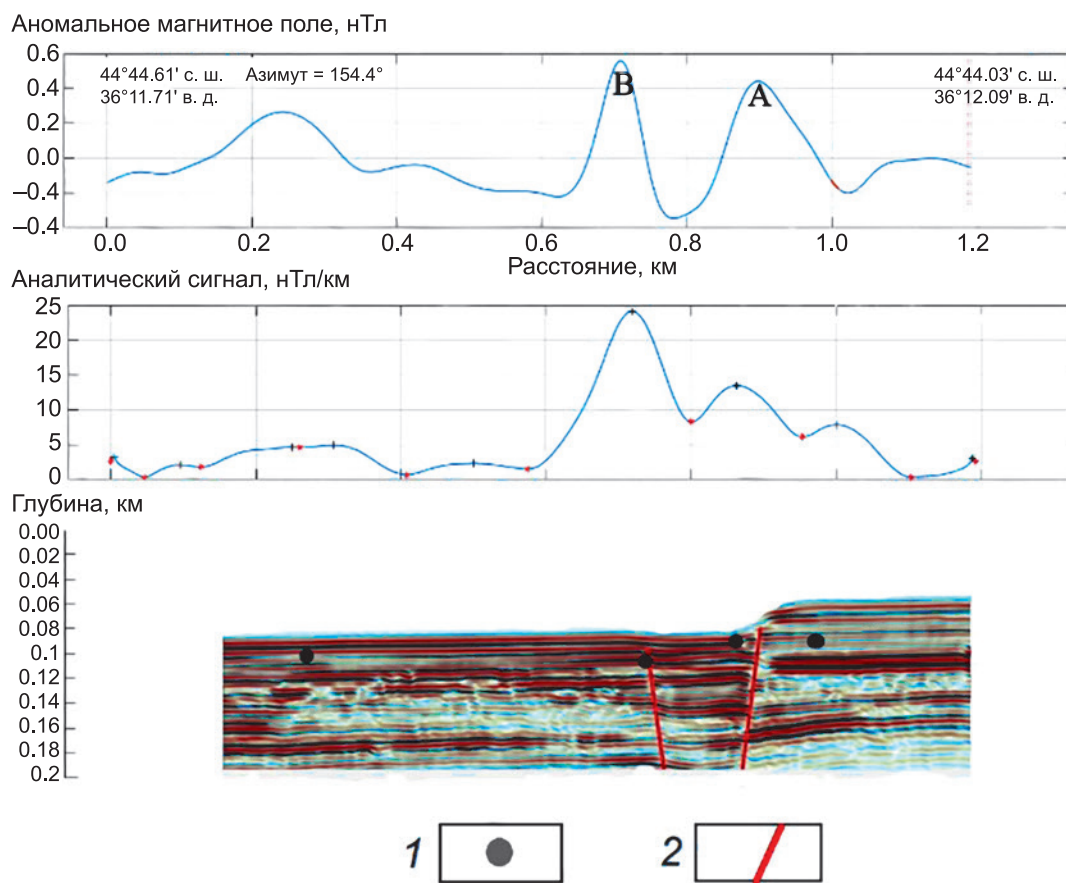


Рис. 9 – Совместная интерпретация сейсмических и магнитометрических данных.  
1 – положение локальных источников АМП; 2 – разрывные нарушения по сейсмическим данным (Иваненко и др., 2020)

### Определение пространственного положения устьев ликвидированных скважин

Проблема промышленной безопасности ликвидированных скважин, пробуренных на шельфе, стала весьма актуальной, учитывая их количество, особенно в пределах арктических акваторий. Скопление углеводородов в приустьевой зоне может привести к серьезным экологическим и техногенным катастрофам, что требует регулярного мониторинга их состояния. Одним из ключевых этапов оценки безопасности таких скважин является точное определение их координат.

С учетом важности экологического контроля заглушенных скважин, Лаборатория геофизических полей Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН с 2014 г. регулярно проводит соответствующие исследования. Работы выполняются в акваториях Баренцева моря, Обской и Тазовской губ Карского моря. Параллельно решается задача обнаружения потенциально опасных техногенных объектов вблизи скважин.

В ходе этих исследований была разработана и успешно применена методика высокоточной магнитной съемки с маломерных судов, предусматривающая построение

сети ортогональных галсов с межгалсовым расстоянием до 5 м в предполагаемом районе расположения скважины.

В качестве примера таких работ рассмотрим изыскания, проведенные в 2021 г. Центром морских исследований МГУ (ЦМИ МГУ) совместно с Лабораторией геофизических полей Института океанологии. Решалась задача обнаружения и мониторинга ликвидированных скважин в акватории Карского моря, в границах Семаковского лицензионного участка. С помощью морской магнитной съемки необходимо было выявить и определить точные координаты шести ликвидированных скважин (№ 65, 101–105) для последующего их обследования водолазной группой. Дополнительно проводился поиск возможных техногенных объектов в непосредственной близости от скважин.

Для выполнения магнитной съемки на исследуемых участках использовался цезиевый морской магнитометр G-882 (рисунок 10).



Рис. 10 – Магнитометр G-882, оснащенный для плавучести надувными кранцами (Феоктистов и др., 2022)

Магнитометр G-882 обладает опцией высокочастотной регистрации магнитного поля (до 10 измерений в секунду), что критически важно для локализации компактных объектов на малых глубинах. В ходе работ цикл измерений составлял 0.5 секунды, что при скорости судна в 5 узлов обеспечивало регистрацию одного значения на каждый метр съемки. Магнитометр буксировался на 60-метровом кабеле с кормы судна длиной 19 м. При таких параметрах буксировки и заданной скорости средняя глубина погружения гондолы составляла около 3 м, что не исключало риск ее контакта с морским дном. Для дополнительной плавучести к корпусу магнитометра были прикреплены надувные резиновые кранцы. Дистанция буксировки более чем в три раза превышала длину судна, что соответствовало требованиям минимизации влияния

его намагниченности на результаты измерений. В процессе гидромагнитной съемки навигация осуществлялась с помощью приемника спутниковой геодезической системы Trimble R7 GNSS, работающего в дифференциальном режиме и обеспечивающего привязку с точностью не хуже 0.3 м.

До начала работ местоположение ликвидированных скважин было известно лишь приблизительно, эти ориентировочные данные использовались для планирования первых рекогносцировочных галсов. Если оператор идентифицировал участок высокоамплитудной магнитной аномалии, то в этой зоне закладывалась система параллельных профилей, покрывающих область обнаруженного экстремума магнитного поля. По мере наращивания количества профилей структура аномалии становилась все более четкой, это позволяло уменьшать межгалсовое расстояние (обычно до 5–10 м) для ее локализации. После обработки полученных данных и построения карт аномального магнитного поля точное положение источника аномалии определялось путем решения обратной задачи в трехмерной постановке. Использование высокоточной системы навигации Trimble R7 GNSS, работающей в режиме дифференциальной коррекции, позволило определять координаты источников аномалий с точностью до 1 м (Феоктистов и др., 2022).

На рисунке 11 показана карта изодинам АМП в районе скважины № 103.

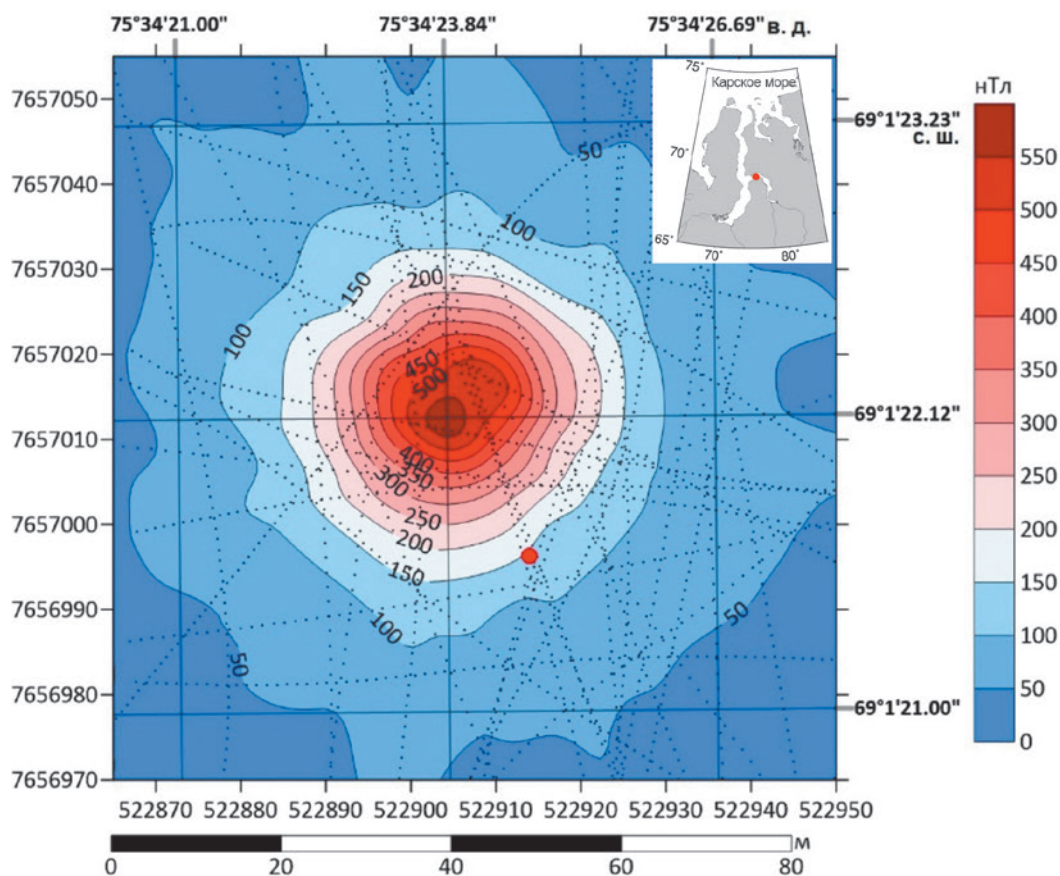


Рис. 11 – Карта изодинам АМП в районе скважины № 103.

Черными пунктирными линиями отмечены галсы магнитной съемки.

Красной точкой отмечены проектные координаты скважины (Феоктистов и др., 2022)

В ходе выполненных исследований удалось достоверно идентифицировать магнитные аномалии, соответствующие стволам шести ликвидированных скважин и ряду других техногенных объектов, а также определить их координаты и глубину залегания. Результаты работ позволили недропользователю организовать водолазное обследование непосредственно в районах расположения устьев скважин (Феоктистов и др., 2022).

Сравнение проектных и фактически определенных координат скважин показало их среднее закономерное расхождение в пределах 20 метров.

Более подробно методика магнитной съемки, а также алгоритмы обработки и интерпретации данных, полученных в Тазовской губе, представлены в статье (Феоктистов и др., 2022).

### Обсуждение результатов и выводы

За две декады развития прикладной магнитометрии в ИО РАН достигнут впечатляющий прогресс как в аппаратном, так и программно-методическом комплексе. Проведенные гидромагнитные исследования подтвердили высокую эффективность метода при решении инженерно-геологических задач.

Были разработаны и проверены в полевых условиях технологические решения, позволяющие обнаруживать и идентифицировать техногенные и геологические объекты на предельно низком уровне полезного сигнала. С помощью разработанных методик успешно проведены инженерно-экологические изыскания в различных морях России, обнаружены и идентифицированы десятки аномальных объектов и структур.

Сравнительный анализ изученных объектов и используемых аппаратных, программных и методических решений приводится в таблицах 1 и 2.

Табл. 1 – Районы работ, задачи исследований, параметры магнитной съемки

Район исследований	Характеристика полигона, глубина до дна (м)	Задача исследований	Название и длина судна (м)	Магнитометр, абсолютная погрешность (нТл)	Скорость судна в узлах / длина забортной части (м)
Северный и Центральный Каспий	Глубокое море, 450–500	инженерная съемка под установку ПБУ и трассу трубопровода	НИС «Рифт», 54	градиентометр ДПМ-2, < 3	5–8 / 200 и 300
Северный Каспий	шельф, 7–20 шельф, 7–14 прибрежная зона, 1.5–7		ГС «Анатолий Гужвин», 61; ГС типа БГК, 36; РК типа Ярославец, 20		5–8 / 200 и 250; 100 и 120; 60 и 70
Карское море (Байдарацкая губа)	шельф, 8–28	определение пространственного положения ниток трубопровода	НИС «Виктор Буйницкий», 45	два градиентометра 2xSeaPOS2; SeaPOS4, 1	4 / 120 (судно), 15 (катер)

Продолжение табл. 1

Район исследований	Характеристика полигона, глубина до дна (м)	Задача исследований	Название и длина судна (м)	Магнитометр, абсолютная погрешность (нТл)	Скорость судна в узлах / длина забортовой части (м)
Печорское море	шельф, 15–30	научные исследования – картирование верхнего слоя осадочного чехла	НИС «Академик Николай Страхов», 76	градиентометр МПМГ-4, < 3	6–7 / 1 канал, 245
Черное море, вблизи Геленджикской бухты	шельф, 38–40	определение пространственного положения затонувшего судна	НИС «Ашамба», 15	G-882, < 2	5 / 50
Черное море, Таманский шельф	шельф, 80–100	инженерная съемка под установку ПБУ	СС «Импульс», 41	G-882, < 2	5 / 267
Печорское море, Обская и Тазовская губа Карского моря	шельф, 10–30 шельф, 5–10	Определение пространственного положения ликвидированных скважин	НИС «Капитан Воронин», 54; НИС «Картеш», 34; РК «Нерха», 19; НИС «Ладога», 20	градиентометр МПМГ-4, < 3 G-882, < 2	6–7 / 1 канал, 180; 5 / 100; 5 / 60

Табл. 2 – Результаты инженерно-геологических и инженерно-экологических исследований

Объекты	Амплитуда аномалии (нТл)	Шаг основной сетки галсов (м) / частота измерений (Гц)	СКО до и после увязки (нТл)	Результаты исследований	Методика съемки и обработки
<b>Северный Каспий. 2004, 2007–2008 гг.</b>					
Площадка Ялама-Самур	8	50 / 0.5	12.67 / 0.61	Обнаружен палеоуступ	Высокоточная градиентная съемка, расчет амплитуды аналитического сигнала, разделение полей по частотам и глубинам до источника. Рассчитана глубина до кровли экранирующего флюида горизонта
Площадка Центральная	2–3	50 / 0.5	9.77 / 0.27	Выделены магнитные аномалии, сопутствующие нефтегазоносным горизонтам	
Площадка имени Филановского (ЛСП2)	2500	25 / 0.5	3.45 / 0.69	Обнаружена заглушенная скважина, 14 техногенных объектов	
Площадка имени Филановского (ЛСП1)	14	25 / 0.5	4.08 / 0.34	Выделены магнитные аномалии, сопутствующие нефтегазоносным горизонтам, обнаружено > 70 техногенных объектов	
Трасса месторождение Филановского – Калмыкия	5–50	50 / 0.5	10.73 / 1.97		

Объекты	Амплитуда аномалии (нТл)	Шаг основной сетки галсов (м) / частота измерений (Гц)	СКО до и после увязки (нТл)	Результаты исследований	Методика съемки и обработки
<b>Карское море (Байдарацкая губа). 2015–2016 гг.</b>					
Участок магистрального газопровода Бованенково – Ухта	200–4350	20, 5 на мелководье при работе с лодки / 1	43.17/9.2; 12.25/2.16 нТл/м для аналитического сигнала	Уточнено положение магистрального трубопровода	Градиентная и полноградиентная съемки. 3D инверсия площадного аналитического сигнала
<b>Геофизический мониторинг на арктическом континентальном шельфе. 2018–2019 гг.</b>					
Шельф Печорского моря	до 30	20–50, 0.5	11.89/1.62	Установлено положение моренных отложений	Разделение поля по частотам и глубинам до источника. Расчет глубин до источника для каждой спектральной составляющей
<b>Магнитная съемка над затопленным судном «Сакко и Ванцетти». 2019 г.</b>					
Носовая часть	150	50 / 1	19.45/3.31	Уточнено положение частей судна	Определение глубины до источника методом инверсии площадного аналитического сигнала и классическим спектральным способом
Корма	280	50 / 1	19.45/3.31		
<b>Геофизические исследования нефтяного месторождения Глубокое на Керченско-Таманском шельфе Черного моря. 2019 г.</b>					
Площадка А1	±3	15 / 2	9.8 / 0.15	Выделены магнитные аномалии, сопутствующие нефтегазоносным горизонтам	Полноградиентный площадной анализ остаточных аномалий с расчетом модуля полного горизонтального градиента и аналитического сигнала. 2D и 3D инверсия для выделенных характерных аномалий
Площадка А2	±6	15 / 2	6.985 / 0.134		
<b>Определение пространственного положения устьев ликвидированных скважин (Обская губа, Тазовская губа, Баренцево и Печорское моря). 2017, 2018, 2021, 2022 гг.</b>					
Скважина	770÷3800	5 / 2	38.73/11.6	Установлено положение 20 заглушенных скважин	Высокоточная магнитная съемка. 3D инверсия для определения координат источника аномалии с точностью 1 м.
Техногенный металлический мусор	50÷1200	5 / 2	38.73/11.6	Обнаружен техногенный мусор, > 10 объектов	

В общей сложности сотрудники лаборатории за последние 20 с лишним лет выполняли инженерные работы с борта 12 исследовательских судов и провели в море более 700 судосуток. За этот период пройдено свыше 17 500 погонных км детальной

морской магнитной съемки, технология которой постоянно развивалась и улучшалась. Был получен ряд важных практических результатов.

Используемая методика морской магнитометрии в сочетании с сейсмоакустическими методами доказала свою эффективность при изучении верхней части осадочного чехла, картировании тектонических нарушений и оценке потенциальных рисков, связанных с разрывными структурами и зонами миграции флюидов.

Достоверность результатов обеспечивается строгим соблюдением требований к методике съемки, включая использование высокоточных навигационных систем. При поиске устьев ликвидированных скважин и выявлении техногенных объектов оптимальным является применение плотной сети ортогональных профилей с межгалсовым расстоянием до 5 м.

При изучении аномалий геологической природы ключевым фактором повышения достоверности результатов является комплексирование магнитометрии с другими геофизическими методами, включая сейсмоакустические и сейсморазведочные изыскания. Совместный анализ таких данных позволяет с высокой точностью картировать потенциально опасные геологические объекты, что особенно важно при проектировании инженерных сооружений на шельфе.

В результате многолетних исследований удалось решить следующие задачи:

**1. Обнаружение и локализация техногенных объектов** – выявлены и определены с точностью до 1 м координаты 21 ликвидированной скважины, в том числе – закрытых осадками, а также свыше 90 возможных техногенных объектов, находящихся на дне или погребенных под небольшим слоем осадков.

**2. Выделение геологических неоднородностей** – на основе совместного анализа данных магнитной съемки и сейсмоакустики на 5 полигонах и двух трассах под трубопроводы выявлены разрывные нарушения, зоны трещиноватости, палеоврезы, палеоуступы и участки повышенной газонасыщенности, которые могут представлять опасность для инженерного строительства.

**3. Анализ аномалий слабой амплитуды** – применение развитой технологии высокоточной модульной и градиентометрической съемок позволило регистрировать и интерпретировать аномалии амплитудой от 0.5 нТл, что обеспечило возможность обнаружения слабомагнитных объектов и областей вторичной минерализации в осадочной толще.

**4. Валидация методики магнитной съемки** – разработанные подходы к организации и обработке магнитометрических данных подтвердили свою эффективность в условиях морских полигонных исследований. Используемая система съемки и методы интерпретации позволили минимизировать влияние судна и естественных геомагнитных вариаций, что обеспечило высокую точность определения источников аномалий.

**5. Практическая значимость полученных данных** – результаты исследований были использованы для оптимизации проектирования инженерных сооружений на морском шельфе, включая обоснование мест размещения буровых платформ и иных инфраструктурных объектов. Обнаруженные устья, в том числе закрытые,



пробуренных скважин позволяют проводить их экологический мониторинг комплексом газогидрохимических и других подобных методов.

Разработаны и внедрены современные аппаратно-программные комплексы, обеспечивающие регистрацию и анализ магнитных аномалий предельно низкой амплитуды (до 0.2–0.3 нТл). Эти технологии успешно применены при инженерно-экологических работах в различных морских акваториях России и позволили выявить и детально обследовать десятки геологических и техногенных объектов.

Полученный опыт применения магнитометрии при инженерно-геологических исследованиях не только подтверждает свою высокую эффективность и информативность, но и открывает перспективы для дальнейшего развития технологии, направленной на повышение вероятности обнаружения и точности определения положения потенциальных геологических опасностей и антропогенных объектов в обширных зонах морских акваторий.

**Благодарности.** Работа выполнена в рамках Госзадания № FMWE-2024-0019.

### Список литературы

1. *Беляев И. И., Филин А. М.* Морской дифференциальный магнитометр ДПМ-2 и опыт его применения // *Океанология*. 1990. Т. 30. № 6. С. 1031–1036.
2. *Березкин В. М., Лощаков А. М., Николаев М. И.* Применение магниторазведки для поисков месторождений нефти и газа // *Прикладная геофизика*. 1982. № 103. С. 128–136.
3. *Богоявленский В. И.* Нефтегазоносность и геолого-геофизическая изученность Каспийского региона // *Бурение и нефть*. 2009. № 6. С. 18–20.
4. *Брусиловский Ю. В., Иваненко А. Н.* Геологические неоднородности осадочного чехла Печерской плиты по данным гидромагнитных съемок // *Океанологические исследования*. 2019. Т. 47. № 1. С. 161–173.
5. *Брусиловский Ю. В., Иваненко А. Н., Филин А. М.* Высокоточная дифференциальная геомагнитная съемка в районах, перспективных на залежи углеводородов (Северный Каспий) // Тезисы докладов «Геология морей и океанов: Материалы XVIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии». Т. V. С. 20–22. М.: ГЕОС, 2009.
6. *Глумов И. Ф., Маловичкий Я. П., Новиков А. А., Сенин Б. В.* Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. 342 с. УДК: 553.98 (262.81).
7. *Головинский В. И., Хортов А. В.* Прогнозирование залежей УВ в Азово-Черноморском и Каспийском регионах по результатам анализа сейсмических атрибутов // Тезисы докладов научно-практической конференции «Геомодель-2004». Геленджик, 2004. С. 66–69.
8. *Городницкий А. М., Филин А. М., Малютин Ю. Д.* Морская магнитная градиентная съемка. М.: ВНИРО, 2004. 140 с.
9. *Гузевич С. Н., Демин Б. Н., Кулагина Т. М., Мищенко В. Д., Ставров К. Г.* Инструкция по морской магнитной съемке (ИМ - 86). М., 1987. 198 с.
10. *Иваненко А. Н., Архипов В. В., Сапунов В. А.* Определение пространственного положения подводных трубопроводов с использованием полноградиентной магнитометрической системы // Научно-технический сборник «Вестник газовой науки». 2018. Т. 36. № 4. С. 94–104.

11. *Иваненко А. Н., Брусиловский Ю. В., Филин А. М., Шишкина Н. А.* Современные технологии обработки и интерпретации магнитных данных при работах на морских месторождениях нефти и газа // *Геофизика*. 2012. № 3. С. 60–70.
12. *Иваненко А. И., Брусиловский Ю. И., Хортов А. В., Веклич И. А.* Геофизические исследования Керченско-Таманского шельфа Черного моря при инженерном строительстве // *Океанологические исследования*. 2020. Т. 48. № 2. С. 91–106.
13. *Колюбакин А. А., Миронюк С. Г., Росляков А. Г., Рыбалко А. Е., Терехина Я. Е., Токарев М. Ю.* Применение комплекса геофизических методов для выявления опасных геологических процессов и явлений на шельфе моря Лаптевых // *Инженерные изыскания*. 2016. № 10–11. С. 38–51.
14. *Кочетов М. В., Шепелев А. А., Челышев С. В.* Возможности набортных гравиметрических и гидромагнитных исследований при решении инженерно-геологических задач на шельфе // *Вестник Московского университета*. 2023. Сер. 4. Геология. № 3. С. 88–97. <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-88-97>.
15. *Меркулов В. П.* Магнитные поля месторождений нефти и газа и возможности их использования при картировании залежей углеводородов // *Известия Томского политехнического университета*. 2002. Т. 305. Вып. 6. С. 218–224.
16. *Пальшин Н. А., Иваненко А. Н., Городницкий А. М., Брусиловский Ю. В., Веклич И. А., Шишкина Н. А.* Геомагнитные исследования в Северной Атлантике // *Океанология*. 2023. Т. 63. № 5. С. 796–812. <https://doi.org/10.31857>.
17. *Семевский Р. Б., Аверкиев В. В., Яроцкий В. А.* Специальная магнитометрия. СПб.: Наука, 2002. 227 с.
18. *Феоктистов Д. В., Шарифуллин И. Ф., Брусиловский Ю. В., Веклич И. А., Иваненко А. Н.* Определение пространственного положения устьев ликвидированных скважин в акватории Тазовской Губы методом площадной магнитной съемки // *Океанологические исследования*. 2022. Т. 50. № 2. С. 163–177.
19. *Чернов А. А., Колесов В. В.* Обнаружение и картирование залежей УВ по их проявлениям в геопотенциальных полях // Специальный выпуск «Геофизика»: «Пангея – 10 лет». ЕАГО, 2004. С. 41–49.
20. *Gorodnitsky A. M., Brusilovsky Yu. V., Ivanenko A. N., Filin A. M., Shishkina N. A.* New methods for processing and interpretation of marine magnetic anomalies and their application to structural research and oil and gas exploration in the Kuril forearc, the Barents sea and the Caspian sea, Russia // *J. of Earth Science Frontiers, China, China University of Geosciences (Beijing)*. 2013. Vol. 4. P. 73–85.
21. *SeaSPY Technical Application Guide*. Marine Magnetism Corporation 2002. Rev. 1.4. P. 5 // <https://marinemagnetism.com>

Статья поступила в редакцию 08.11.2024, одобрена к печати 12.03.2025.

**Для цитирования:** *Иваненко А. Н., Брусиловский Ю. В., Веклич И. А., Городницкий А. М.* Опыт использования высокоточной магнитной съемки при морских инженерно-экологических изысканиях // *Океанологические исследования*. 2025. № 53 (1). С. 18–46. [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(1\).2](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).2).

## EXPERIENCE OF USING HIGH-PRECISION MAGNETIC SURVEYING IN MARINE ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL STUDIES

A. N. Ivanenko, Yu. V. Brusilovsky, I. A. Veklich, A. M. Gorodnitsky

*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
36, Nakhimovskiy prospekt, Moscow, 117997, Russia,  
e-mail:ivanenko.an@ocean.ru, brusilovsky.yv@ocean.ru*

The article summarizes the long-term experience of utilizing marine magnetic surveying in engineering, geological and ecological investigations conducted by the Laboratory of Geophysical Fields at the Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences from 2000 to 2020. High-precision magnetic surveying has been applied to address a wide range of practical tasks, including environmental monitoring of underwater wells, engineering and geological studies for the installation of drilling platforms and the construction of oil and gas pipelines, detection of anthropogenic debris, and monitoring surveys ensuring the safe operation of underwater trunk pipelines. It is demonstrated that the effectiveness of the method is achieved by adhering to specific survey methodology requirements. The presence of a high-precision navigation system, providing the necessary positioning accuracy, along with a dense network of orthogonal survey lines, reliably ensures the determination of the spatial location of decommissioned wellheads and the detection of anthropogenic objects.

A key factor in enhancing the efficiency of geophysical surveys for mapping potentially hazardous geological structures is an integrated approach. The study examines the potential for combined use of magnetic surveying and high-resolution seismic exploration. This integration enables a more reliable characterization of paleostructures, tectonic faults, and other potentially hazardous geological formations.

The qualitative evolution of hardware and software systems used at the Institute of Oceanology for applied magnetometric studies is demonstrated, along with the corresponding expansion of methodological capabilities.

**Keywords:** marine magnetic survey, gradiometry, engineering and geological investigations, environmental monitoring, paleostructures

**Acknowledgments:** The work was carried out within the framework of State Assignment No. FMWE-2024-0019.

### References

1. Belyaev, I. I. and A. M. Filin, 1990: Morskoy differentsial'nyy magnitometr DPM-2 i opyt yego primeneniya. *Oceanology*, **30** (6), 1031–1036.
2. Berezkin, V. M., A. M. Loschakov, and M. I. Nikolaev, 1982: Primenenie magnitorazvedki dlya poiskov mestorozhdeniy nefi i gaza. *Prikladnaya geofizika*, **103**, 128–136.
3. Bogoyavlenskiy, V. I., 2009: Neftgazonosnost' i geologo-geofizicheskaya izuchennost' Kaspiyskogo regiona. *Burenie i nefi*, **6**, 18–20.
4. Brusilovsky, Yu. V. and A. N. Ivanenko, 2019: Geologicheskiye neodnorodnosti osadochnogo chekhla Pechyorskoy plity po dannym gidromagnitnykh syomok. *Journal of Oceanological Research*, **47** (1), 161–173.

5. Brusilovsky, Yu. V., A. N. Ivanenko, and A. M. Filin, 2009: Vysokotochnaya differentsial'naya geomagnitnaya syomka v rayonakh, perspektivnykh na zalezhi uglevodorodov (Severnuyu Kaspий). *Tezisy dokladov Geologiya morey i okeanov: Materialy XVIII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkoly) po morskoy geologii*, Moscow, GEOS, V, 20–22.
6. Chernov, A. A. and V. V. Kolesov, 2004: Obnaruzhenie i kartirovanie zalezhiy UV po ikh proyavleniyam v geopotentsial'nykh polyakh. *Spetsial'nyy vypusk "Geofizika": "Pangea – 10 let"*. YAGO, P. 41–49.
7. Feoktistov, D. V., I. F. Sharifullin, Yu. V. Brusilovsky, I. A. Veklich, and A. N. Ivanenko, 2022: Opredelenie prostranstvennogo polozheniya ust'yev likvidirovannykh skvazhin v akvatorii Tazovskoy Guby metodom ploshchadnoy magnitnoy syomki. *Journal of Oceanological Research*, **50** (2), 163–177.
8. Glumov, I. F., Ya. P. Malovichkiy, A. A. Novikov, and B. V. Senin, 2004: *Regional'naya geologiya i neftegazonosnost' Kaspiyskogo morya*. Moscow, Nedra-Biznescentr, 342 p., UDC: 553.98 (262.81).
9. Golovinskiy, V. I. and A. V. Khortov, 2004: Prognozirovaniye zalezhiy UV v Azovo-Chernomorskom i Kaspiyskom regionakh po rezul'tatam analiza seysmicheskikh atributov. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii «Geomodel-2004»*. Gelendzhik, 66–69.
10. Gorodnitsky, A. M., A. M. Filin and Yu. D. Malyutin, 2004: *Morskaya magnitnaya gradientnaya syomka*. Moscow, VNIRO, 140 p.
11. Gorodnitsky, A. M., Yu. V. Brusilovsky, A. N. Ivanenko, A. M. Filin, and N. A. Shishkina, 2013: New methods for processing and interpretation of marine magnetic anomalies and their application to structural research and oil and gas exploration in the Kuril forearc, the Barents Sea and the Caspian Sea, Russia. *J. of Earth Science Frontiers*, China, China University of Geosciences (Beijing), **4**, 73–85.
12. Guzevich, S. N., B. N. Demin, T. M. Kulagina, V. D. Mishchenko, and K. G. Stavrov, 1987: *Instruktsiya po morskoy mag nitnoy syomke (IM-86)*. Moscow, 198 p.
13. Ivanenko, A. N., V. V. Arkhipov, and V. A. Sapunov, 2018: Opredelenie prostranstvennogo polozheniya podvodnykh truboprovodov s ispol'zovaniyem polnogradientnoy magnitometricheskoy sistemy. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik Vestnik gazovoy nauki*, **36** (4), 94–104.
14. Ivanenko, A. N., Yu. V. Brusilovsky, A. M. Filin, and N. A. Shishkina, 2012: Sovremennyye tekhnologii obrabotki i interpretatsii magnitnykh dannykh pri rabotakh na morskikh mestorozhdeniyakh nefi i gaza. *Geofizika*, **3**, 60–70.
15. Ivanenko, A. I., Yu. I. Brusilovsky, A. V. Khortov, and I. A. Veklich, 2020: Geofizicheskiye issledovaniya Kerchensko-Tamanskogo shel'fa Chyornogo morya pri inzhenernom stroitel'stve. *Journal of Oceanological Research*, **48** (2), 91–106.
16. Kolyubakin, A. A., S. G. Mironyuk, A. G. Roslyakov, A. E. Rybalko, Ya. E. Terekhina, and M. Yu. Tokarev, 2016: Primeneniye kompleksa geofizicheskikh metodov dlya vyyavleniya opasnykh geologicheskikh protsessov i yavleniy na shel'fe morya Laptevnykh. *Inzhenernyye izyskaniya*, 10–11, 38–51.
17. Kochetov, M. V., A. A. Shepelev, and S. V. Chelyshev, 2023: Vozmozhnosti nabortnykh gravimetricheskikh i gidromagnitnykh issledovaniy pri reshenii inzhenerno-geologicheskikh zadach na shel'fe. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 4. Geologiya*, **3**, 88–97, <https://doi.org/10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-3-88-97>.

Иваненко А. Н. и др.

18. Merkulov, V. P., 2002: Magnitnyye polya mestorozhdeniy nefi i gaza i vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya pri kartirovani zalezhiy uglevodorodov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, **305** (6), P. 218–224.
19. Pal'shin, N. A., A. N. Ivanenko, A. M. Gorodnitsky, Yu. V. Brusilovsky, I. A. Veklich, and N. A. Shishkina, 2023: Geomagnitnyye issledovaniya v Severnoy Atlantike. *Oceanology*, **63** (5), 796–812, <https://doi.org/10.31857/S0030157423050131>, EDN: PWDMT0.
20. *SeaSPY Technical Application Guide*, 2002: Marine Magnetism Corporation, **1.4**, 5 <https://marinemagnetism.com>.
21. Semevskiy, R. B., V. V. Averkiyev, and V. A. Yarotskiy, 2002: *Spetsial'naya magnitometriya*. Saint Petersburg, Nauka, 227 p.

Submitted 08.11.2024, accepted 12.03.2025.

**For citation:** Ivanenko, A. N., Yu. V. Brusilovsky, I. A. Veklich, and A. M. Gorodnitsky, 2025: Experience of using high-precision magnetic surveying in marine engineering and environmental studies. *Journal of Oceanological Research*, **53** (1), 18–46, [https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53\(1\).2](https://doi.ocean.ru/10.29006/1564-2291.JOR-2025.53(1).2).