

Разработка и внедрение методики высокоточных гидромагнитных и набортных гравиметрических исследований при инженерных изысканиях на шельфе

■ Базилевич С.О., Казанина М.А., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А., Кочетов М.В., г. Мурманск.

Аннотация. В данной статье рассмотрены результаты разработки и внедрения методики высокоточных гидромагнитных и набортных гравиметрических исследований при инженерных изысканиях на шельфе Российской Федерации. В статье рассказывается об инновационных технологиях Акционерного общества «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО «МАГЭ») при проведении морских инженерных изысканий на шельфе России, которые демонстрируют инновационный вектор развития отечественной морской геофизики. Строительство и эксплуатация морских сооружений нефтегазовой промышленности, а также выполнение поисково-разведочных работ на континентальном шельфе требуют проведения комплекса инженерно-геологических изысканий для детального изучения морского дна и придонной части грунтового массива. В данной работе рассматривается методика выполнения высокоточной гидромагнитной и набортной гравиметрической съемки. Главная задача представленной методики заключается в повышении эффективности гидромагнитных наблюдений с целью минимизации среднеквадратической ошибки съемки, а также включение набортной гравиметрии в стандартный набор геофизических методов при выполнении инженерных изысканий на шельфе.

Ключевые слова: гидромагнитные исследования, набортные гравиметрические исследования; Карское море, континентальный шельф, геофизические методы, морские инженерные изыскания.

Введение

Эффективное освоение нефтегазовых ресурсов континентального шельфа Российской Федерации и особенно его арктической части является актуальной и стратегической задачей, обоснованной наличием уникальных разведанных углеводородных запасов. В этой связи нефтегазодобывающие кампании проявляют большой интерес к освоению ресурсов данного региона и имеют большие планы по строительству эксплуатационных скважин.

Освоение месторождений арктического шельфа характеризуется большой степенью риска в связи с суровыми климатическими условиями и труднодоступностью из-за удаленности от берега. Для обустройства данного вида месторождений необходимы огромные финансовые затраты и поэтому получе-

ние полного объема информации о строении придонной части геологического разреза и локализация опасных и неблагоприятных геологических объектов и явлений для минимизации рисков при строительстве нефтегазовой инфраструктуры является важным этапом разработки шельфовых месторождений.

На сегодняшний день планирование строительства эксплуатационных скважин на континентальном шельфе в пределах лицензионных участков сопровождается обязательным этапом выполнения комплексных морских инженерно-геологических изысканий, предназначенных для получения полного объема исходных данных для разработки проектной документации на подготовительном этапе строительства.

Авторами предложена методика выполнения гидромагнитной съемки,

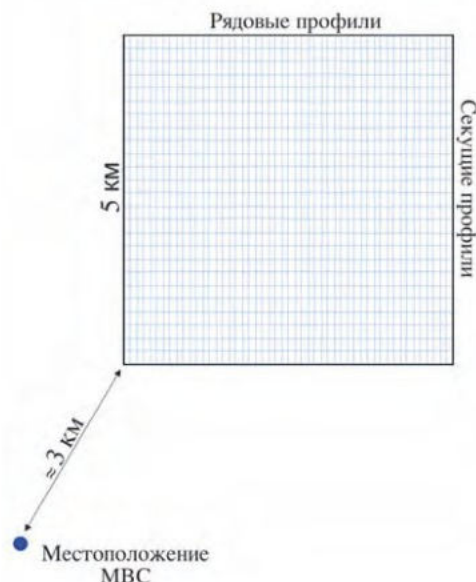
которая является обязательным методом в рамках выполнения инженерных изысканий на арктическом шельфе, включающая одновременное использование градиентометрической установки и магнитовариационной станции. Данное совмещение позволяет получать высокоточные магниторазведочные данные и повысить достоверность последующей комплексной интерпретации геофизических данных. Также авторами предложено включение гравиразведочных исследований в стандартный набор геофизических методов при морских инженерных изысканиях. Данные методические особенности позволяют выполнять комплексирование данных потенциальных полей с данными сейсморазведочных исследований с целью локализации и уточнения строения геологических опасностей, которые представляют большую опасность при строительстве подводных нефтегазовых сооружений.

Методические особенности гидромагнитной съемки

Инженерно-геологические изыскания на участке в юго-западной части Карского моря в пределах арктического шельфа были выполнены специалистами Акционерного общества АО «МАГЭ» на собственном научно-исследовательском судне «Геолог Дмитрий Наливкин».

Инженерно-геологические изыскания выполнены на 51 меридиональном (рядовом) и 26 широтных (секущих) профилях. Расстояние между меридиональными профилями – 100 м, широтными – 200 м. Длина каждого профиля 5 км. Всего на объекте выполнено 385 пог. км комплексных наблюдений (рис. 1).

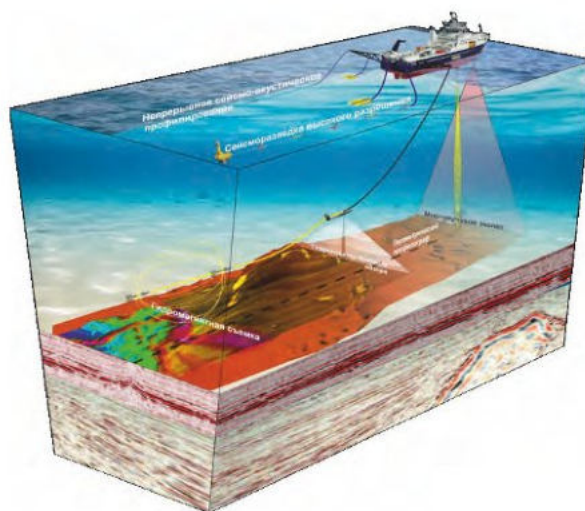
В исследуемом районе работ применялся традиционный комплекс геофизических исследований в составе инженерно-геологических изысканий: сейсморазведка высокого разрешения (СВР), высо-



▲ Рис. 1. Карта фактического материала участка исследований.

кочастотное (ВЧ) и низкочастотное (НЧ) непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП), электроразведочные работы методом ЗСБ, гидролокация бокового обзора (ГЛБО) и гидромагнитная съёмка [4]. Широкий спектр геофизических методов, входящих в состав инженерных изысканий, позволяет осуществлять комплексный анализ всех имеющихся данных, что повышает достоверность итогового результата (рис. 2).

▼ Рис. 2. Схема буксировки геофизического оборудования.



Наборные гравиметрические исследования

Гравиметрические исследования не входят в стандартный комплекс геофизических методов при инженерных изысканиях на шельфе, однако возможности современных технологий позволяют пересмотреть её роль при комплексировании геофизических данных. Перспективы гравиразведки связаны с совершенствованием гравиметрической аппаратуры, повышением её точности и надёжности, а также с развитием математического аппарата интерпретации данных.

Качественный скачок в развитии инерциально-спутниковых технологий сделал возможным выполнение гравиметрических измерений не только с морских судов, но и с самолетов. К настоящему моменту достижимая точность аэрогравиметрических наблюдений составляет 0.5-1 мГал, точность морских набортных съёмок может достигать 0.1 мГал, а точности наземных и донных гравиметрических наблюдений уже достигают первых десятков мкГал, 10 мкГал = 0.01 мГал. Высокоточные гравиметрические съёмки микрогальной точности позволяют изучать тонкую структуру поля силы тяжести и фиксировать её минимальные изменения.

Гравиметрические исследования с использованием современных методов интерпретации позволяют успешно выделять нефтегазоперспективные объекты, изучать строение соляных толщ, трассировать тектонические нарушения в осадочном чехле и фундаменте, выявлять аномальные зоны в отдельных интервалах разреза и т.д. Кроме того, гравиразведка способна дать оценку возможности развития опасных геологических и инженерно-геологических процессов и явлений, таких как газонасыщенные грунты и с аномально высоким

пластовым давлением в ВЧР, разжижение поверхностных грунтов и их подвижки. Гравиметрические исследования применяются при мониторинге газовых и газоконденсатных месторождений при их разработке, как на шельфе, так и на суше. Донные гравиметрические исследования, выполняемые с целью гравиметрического мониторинга, позволяют отслеживать и контролировать изменения положения уровня газо-водяного контакта (ГВК) и таким образом могут предупредить проникновение воды в добывающие скважины. В комплексе методов гравиразведка решает специфические задачи: определение плотностного строения толщи пород вносит свой вклад в построение модели геологического строения изучаемой территории и используется для прогнозирования геофизической обстановки и состояния окружающей среды.

Наблюдения ускорения силы тяжести проводились морским набортным гравиметром «Чекан-АМ» (разработчик АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016). Гравиметр был включен при отходе судна из порта г. Мурманск и находился в рабочем режиме на протяжении всего рейса (рис. 3).

▼ Рис. 3. Морской набортный гравиметр «Чекан-АМ».



Методика выполнения гидромагнитной съёмки

Гидромагнитная съёмка традиционно выполняется с целью изучения рельефа, тектонического районирования фундамента, определения мощности осадочного чехла, выделения зон тектонических нарушений и поисков полезных ископаемых в морях и океанах [1, 2].

Морская магнитометрическая съёмка является неотъемлемой частью детальных инженерно-геологических изысканий при изучении верхней части разреза осадочной толщи. Главная задача данных работ заключается не в поиске отдельных магнитных аномалий, а в создании детальной высокоточной карты аномалий магнитного поля для изучаемых акваторий с минимальной погрешностью, что дает возможность выявить даже относительно слабые магнитные аномалии, наиболее интересные как потенциально опасные объекты при строительстве инженерных сооружений. На сегодняшний день гидромагнитные исследования хорошо себя зарекомендовали при картировании подводных вулканов в морях, поисках залежей углеводородов в условиях арктического шельфа, а также обнаружении металлических объектов: трубопроводов, кабелей и затонувших судов на акваториях, в т.ч. в условиях Крайнего Севера [3, 5].

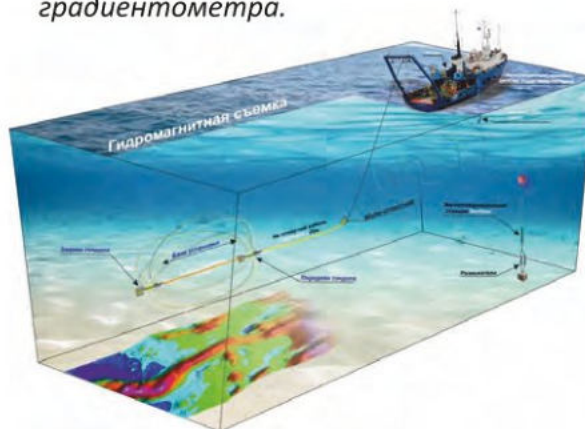
При решении морских инженерных задач применяется методика дифференциальной гидромагнитной съёмки, в которой используются два расположенных на определенном расстоянии друг от друга магнитометра, измеряющих разности компонент полного вектора индукции T магнитного поля Земли. Преимуществом данной технологии является отсутствие зависимости измеряемого градиента магнитного поля от солнечно-суточных магнитных вариаций, имеющих

значительные амплитуды в северных широтах. Однако при получении данных по градиенту магнитного поля на двух датчиках магнитометров может возникнуть большая проблема, связанная с процедурой восстановления магнитного поля по измеренному горизонтальному градиенту, из-за методических особенностей проведения инженерных гидромагнитных исследований [6].

В рамках данной работы опробована методика гидромагнитной съёмки, совмещающая одновременное использование магнитовариационной станции (МВС) и градиентометра. Такое совмещение обеспечивает минимально возможную погрешность магнитной съёмки, которая позволяет в дальнейшем провести уверенную локализацию возможных аномальных опасных объектов для строительства сооружений морской нефтегазовой инфраструктуры (рис. 4).

При проведении площадной дифференциальной магнитной съёмки использовались магнитометры SeaSPY2 (рис. 2.10, а). Для корректной пространственной привязки съёмочных галсов и локализации магнитных аномалий в данной работе применялась система подводного гидроакустического позиционирования Sonardyne Ranger 2 USBL с точностью позиционирования 0,3-0,5 м в режиме реального времени. Sonardyne Ranger 2

▼ Рис. 4. Схема буксировки продольного градиентометра.



USBL является автономной системой расчета позиции маяка-ответчика, установленного на буксируемых объектах, включающей в себя акустические антенны в забортном блоке со встроенной инерциальной системой, датчиком угловых и вертикальных перемещений. В качестве источника данных о географическом положении приемо-передающей антенны USBL использовался DGNSS-приемник (от англ. Differential Global Navigation Satellite System) C-Nav 3050. Sonardyne Ranger 2 USBL работал с маяками-ответчиками WMT 6G Type 8190 фирмы Sonardyne и Sigma BCN 1119 Type 1100 фирмы Applied Acoustics. Приемо-передающая антенна HPT 5000 была установлена на штангу по правому борту судна [7, 8, 9].

Для получения данных, свободных от влияния солнечно-суточных вариаций, использовалась MBC Sentinel (рис. 2.10, б), установленная на морском дне. Данные работы были выполнены в комплексе с широким набором геофизических и гидрографических методов с учетом и на основании методических положений соответствующих норм и стандартов. Система SeaSPY2 является полностью цифровой. Морской магнитометр состоит из набортного регистрирующего устройства и забортной части. Измерение магнитного поля происходит внутри забортной буксируемой гондолы, где уровень сигнала максимален из-за отсутствия внешних помех. Принцип работы магнитометра SeaSPY2 основан на использовании эффекта Оверхаузера (высокочувствительный всенаправленный датчик): устройство измеряет внешнее магнитное поле при помощи особого алгоритма технологии ядерного магнитного резонанса. Датчики SeaSPY2 обеспечивают точность 0,1 нТл. Для определения их высоты (альтитуды) над дном в

магнитометре установлен альтиметр — высокоточный эхолот с частотой 200 кГц. Магнитометр также снабжен датчиком давления. Для устранения влияния судна на данные магнитного поля магнитометры буксируются на удалении от кормы, равном не менее чем трем длинам судна, и на высоте 5–7 м над морским дном. Запись магнитометрических данных ведется с частотой 1 Гц. Точность измерений (полученных данных) проверяется в точках пересечения рядовых профилей с секущими. Используемая конфигурация оборудования позволяет получить значения модуля полного вектора индукции магнитного поля Земли T с исключенным влиянием вариаций магнитного поля с помощью соответствующих математических операций. Восстановление поля, относящегося к середине измерительной установки, выполняется по измеренному горизонтальному градиенту магнитного поля. База измерительной установки должна стремиться к минимально возможной, т.к. при восстановлении происходит осреднение магнитного поля на длине базы. Но уменьшение базы способствует увеличению относительной погрешности измеренного градиента и, следовательно, погрешности восстановленного поля. Размер базы измерительной установки величиной 11,5 м был выбран в целях локализации небольших потенциально опасных объектов на морском дне и в придонной части грунтового массива.

Учет солнечно-суточных вариаций магнитного поля Земли является главной трудностью при проведении гидромагнитных измерений, поскольку стационарные магнитовариационные обсерватории в большинстве случаев располагаются на большом удалении от проектного местоположения работ. Поэтому для решения поставленной инженерно-

геологической задачи была разработана и применена методика съемки, подразумевающая использование МВС на исследуемой территории для исключения операции восстановления поля. В целях осуществления измерений вариаций магнитного поля в районе работ на дне была установлена МВС марки Sentinel, которая представляет собой полностью автономную станцию долгосрочного наблюдения магнитного поля, использующую всенаправленный датчик Оверхаузера с низким энергопотреблением, размещенный в герметичном корпусе. Вариационная станция располагалась на расстоянии 3 км от границы исследуемой площади для исключения влияния судна на показания. МВС была установлена непосредственно перед началом проведения основного этапа съемки, время измерений на градиентометре и станции было синхронизировано с точностью до 1 с. Автономные непрерывные измерения вариационного магнитного поля выполнялись с периодом 1 мин.

Результаты и выводы

Применение магнитовариационной станции позволяет уменьшить СКП гидромагнитной съемки, следовательно, повышается достоверность получаемых результатов, появляется возможность построения карт изолиний с минимальным сечением, что позволяет выделять потенциально опасные объекты, которые не были бы выделены при стандартной методике съемки.

В результате использования магнитовариационной станции возможно повысить эффективность съемки и добиться среднеквадратической ошибки равной 1 нТл. Объекты с величиной индукции магнитного поля превышающего СКП в 2-3 раза могут считаться достоверными. Также использование данных МВС при

обработке полевых данных позволило выявить оси линейных магнитных аномалий, которых не было обнаружено при обработке данных градиентометра.

Разработанная методика была успешно применена при проведении инженерно – геофизических исследований на Арктическом шельфе. Выполненные работы позволили получить методические рекомендации, позволяющие минимизировать ошибку наблюдений гидромагнитной съемки, следовательно, увеличить достоверность получаемых моделей источников изучаемого поля, что существенно уменьшит неопределенность при выявлении природы магнитных аномалий.

Одним из ключевых преимуществ проведения таких работ является возможность экономии средств и времени на этапе проектирования. Благодаря гравиметрическим исследованиям, специалисты могут получить более точную информацию о геологических условиях, что позволит снизить вероятность возникновения непредвиденных ситуаций во время строительства и эксплуатации объектов. Это, в свою очередь, может уменьшить затраты на устранение последствий ошибок и повысить общую эффективность работ.

Кроме того, проведение гравиметрических работ способствует развитию кадрового потенциала отрасли, так как требует привлечения специалистов различных областей, таких как геология, геодезия, гидрография и экология. Обучение и повышение квалификации сотрудников позволяет им приобрести новые навыки и знания, которые могут быть использованы в других проектах и сферах деятельности.

Таким образом, экономически-кадровое обоснование морских гравиметрических работ заключается в воз-

возможности экономии средств и ресурсов на этапе проектирования. При минимальных экономических затратах можно получить значительный прирост объема геофизических данных для дальнейшей комплексной интерпретации геофизических материалов, что в свою очередь позволяет повысить достоверность итоговых результатов работ. Также включение гравиразведки в стандартный комплекс методов при морских инженерных изысканиях позволит повысить необходимость привлечения новых рабочих мест для отраслевых специалистов.

Комплексирование геофизических методов позволяет получить более полную и точную информацию о свойствах и структуре исследуемых объектов, что может привести к снижению затрат на проведение дополнительных исследований и повышению эффективности разработки месторождений. Кроме того, использование современных методов обработки данных позволяет сократить время на обработку и анализ результатов, что также может привести к экономии средств.

Приведенные в статье результаты измерений потенциальных полей показали высокую эффективность методов при локализации палеоврезов и трассировании их границ. Высокоточная аппаратура позволяет изучать тонкую структуру геофизических полей, повышает требовательность к обработке и интерпретации наблюдений, тем самым ставит новые задачи перед геофизиками. Информация о тонкой структуре потенциальных полей детализирует региональные модели геомагнитного и гравитационного поля.

Литература

1. Владов М.Л., Старовойтов А.В., 1998. Геофизические методы инженерно-геологических задач. ГСД Продакшен, Москва с. 67.
2. Гордин В.М., Розе Е.Н., Углов Б.Д., 1986. Морская магнитометрия. Недра.
3. Казанин А.Г., Шепелев А.А., Коснырева М.В., Жилин Ф.Е., Демонов А.П., Кочетов М.В. Комплексирование данных сейсморазведки и магниторазведки при анализе палеоврезов и палеопонижений шельфа Карского моря // Приборы и системы разведочной геофизики. 2023. № 3. С. 131-139.
4. Казанин Г.С., Казанин А.Г. и др., 2018. Технология комплексных инженерно-геофизических изысканий на арктическом шельфе // Сборник работ лауреатов международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. Москва. С. 39-41.
5. 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. Серия 4: Геология. 2023. № 3. С. 88-97.
6. Кочетов М.В., Журавлев В.А. Оптимизация методики дифференциальной гидромагнитной съемки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2018. № 2. С. 127-131.
7. Шепелев А.А., Коснырева М.В., 2023. Измерения вариаций магнитного поля Земли в акватории Карского моря с помощью мобильной магнитовариационной станции // Гелиогеофизические исследования. № 38. С. 54-60.
8. Шепелев А.А., Жилин Ф.Е., Демонов А.П. Эффективность выполнения гидромагнитных градиентометрических исследований с использованием магнитовариационной станции при инженерно-геологических изысканиях на континентальном арктическом шельфе // Инженерные изыскания, 2021. Том XV. № 3-4. С. 32-41.
- Shepelev A.A. and Zhilin F.E., 2021. Comparison of Processing Results of Magnetometric Data Using Magnetic Base Station and Gradiometer in Offshore Engineering Survey. Engineering and Mining Geophysics 2021, European Association of Geoscientists & Engineers. Vol. 2021. Issue 1. Pp. 1-7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202152018>.