

Морские комплексные инженерные изыскания на континентальном шельфе: опыт и результаты АО «МАГЭ»

■ Шепелев А.А., Барков Б.В., АО «МАГЭ», г. Москва.

■ Казанин А.Г., Жилин Ф.Е., АО «МАГЭ», г. Мурманск.

Аннотация: Освоение ресурсов континентального шельфа, включая нефтегазовые месторождения, представляет собой сложный и многоэтапный процесс, который невозможен без проведения детальных инженерных изысканий. Эти исследования являются ключевым элементом в обеспечении безопасности и надежности эксплуатации морских объектов, таких как буровые платформы, гидротехнические сооружения и подводные трубопроводы.

В статье рассматриваются методические особенности и результаты морских комплексных инженерных изысканий, выполненных АО «МАГЭ» на континентальном шельфе. Основное внимание уделено обеспечению безопасности при эксплуатации объектов, что достигается за счет тщательного анализа геологического строения морского дна и выявления потенциальных угроз.

Авторы подробно описывают современные методики и специализированное оборудование, используемое для изучения рельефа дна, геологических процессов и свойств грунтов. Эти данные позволяют минимизировать риски, связанные с установкой и эксплуатацией нефтегазовых объектов. Особое внимание уделено комплексной интерпретации данных, полученных в ходе инженерно-геологических исследований. В статье обосновываются подходы к оценке геологических рисков, таких как оползни, разжижение грунтов, сейсмическая активность и другие природные явления, которые могут повлиять на устойчивость объектов на шельфе. Подчеркивается важность применения комплексного подхода, который включает геофизические, геологические и геотехнические методы.

Такой подход позволяет повысить точность прогнозов и снизить вероятность аварийных ситуаций. Результаты исследований демонстрируют, что использование современных технологий и методик значительно повышает уровень безопасности и надежности эксплуатации морских объектов. Статья также акцентирует внимание на необходимости дальнейшего развития и совершенствования методов морских инженерных изысканий. Это особенно важно для обеспечения устойчивого освоения ресурсов континентального шельфа в условиях растущих требований к экологической безопасности и экономической эффективности.

Авторы приходят к выводу, что благодаря внедрению инновационных технологий и комплексному анализу данных можно достичь высоких стандартов безопасности и минимизировать риски при освоении шельфовых месторождений.

Ключевые слова: континентальный шельф, морские комплексные инженерные изыскания, инженерно-геологические исследования, нефтегазовая инфраструктура, геофизические исследования, сейсморазведка, опасные геологические процессы и явления.

Введение

Главная задача инженерных изысканий на континентальном шельфе заключается в комплексном изучении особенностей строения верхней части разреза (ВЧР), состоящей преимущественно из горизонтально-слоистой толщи. Это включает определение инженерно-геологических и инженерно-геокриологических условий района работ, а также выявление потенциально опасных объектов и неблагоприятных явлений, способных повлиять на строительство морской нефтегазовой инфраструктуры.

Комплекс инженерно-геологических изысканий на шельфе направлен на изучение особенностей геологического строения донных осадков, а также на обнаружение и локализацию геологических и техногенных опасностей. Данные факторы могут представлять угрозу при строительстве нефтегазопромысловых сооружений, таких как плавучие буровые установки (ПБУ), самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ), полупогружные буровые установки (ППБУ), нефтепогрузочные терминалы, внутрипромысловые трубопроводы, морские хранилища и объекты подводного обустройства месторождений.

Объекты исследований, как правило, сосредоточены в интервале глубин от поверхности морского дна до первых сотен метров, который условно называется верхней частью разреза (ВЧР). Континентальный шельф представляет собой зону вокруг материков, простирающуюся от береговой линии (при низком стоянии уровня воды во время отлива) до бровки континентального склона, где происходит резкое увеличение глубины моря.

Комплексный подход к геолого-геофизическим исследованиям обладает значительными преимуществами по

сравнению с применением отдельных методов. Эффективное изучение ВЧР требует выбора оптимального комплекса исследований с учетом потенциальных возможностей каждого метода, их информативности и совместимости разнородных данных.

Комплексные морские инженерные изыскания представляют собой обязательный этап подготовки и реализации проектов, связанных с освоением континентального шельфа, строительством морской инфраструктуры, прокладкой подводных трубопроводов и кабельных линий, а также обеспечением экологической и техногенной безопасности морских акваторий. Эти изыскания включают широкий спектр исследований, направленных на изучение рельефа морского дна, геологического строения, инженерно-геологических, геоморфологических, гидрометеорологических и экологических условий. В рамках изысканий также определяется состав, состояние и физико-механические свойства грунтов. Полученные данные используются для обоснования размещения полупогружных и самоподъемных плавучих буровых установок (ППБУ и СПБУ) на исследуемых участках акватории.

В условиях активного развития добычи углеводородов на континентальном шельфе, расширения морской логистики и строительства портовой инфраструктуры значение инженерных изысканий существенно возрастает. Они обеспечивают устойчивость и надежность проектируемых объектов, что делает их неотъемлемой частью реализации крупных инфраструктурных проектов.

В состав инженерных изысканий для строительства объектов на континентальном шельфе входят:

- инженерно-геологические изыскания;

- инженерно-гидрометеорологические изыскания;
- инженерно-геодезические изыскания;
- инженерно-экологические изыскания;
- Подводно-технические работы.

АО «Морская арктическая геологоразведочная экспедиция» (АО «МАГЭ») на протяжении многих лет успешно выполняет данный вид работ, обладая уникальным опытом и современным оборудованием для проведения комплексных морских инженерных изысканий. Компания активно участвует в проектах по освоению шельфа Арктики и других регионов, обеспечивая высокое качество исследований и соответствие международным стандартам. Благодаря профессионализму сотрудников и использованию передовых технологий, АО «МАГЭ» вносит значительный вклад в развитие морской инфраструктуры и обеспечение безопасности при реализации сложных проектов в морских акваториях [1-3].

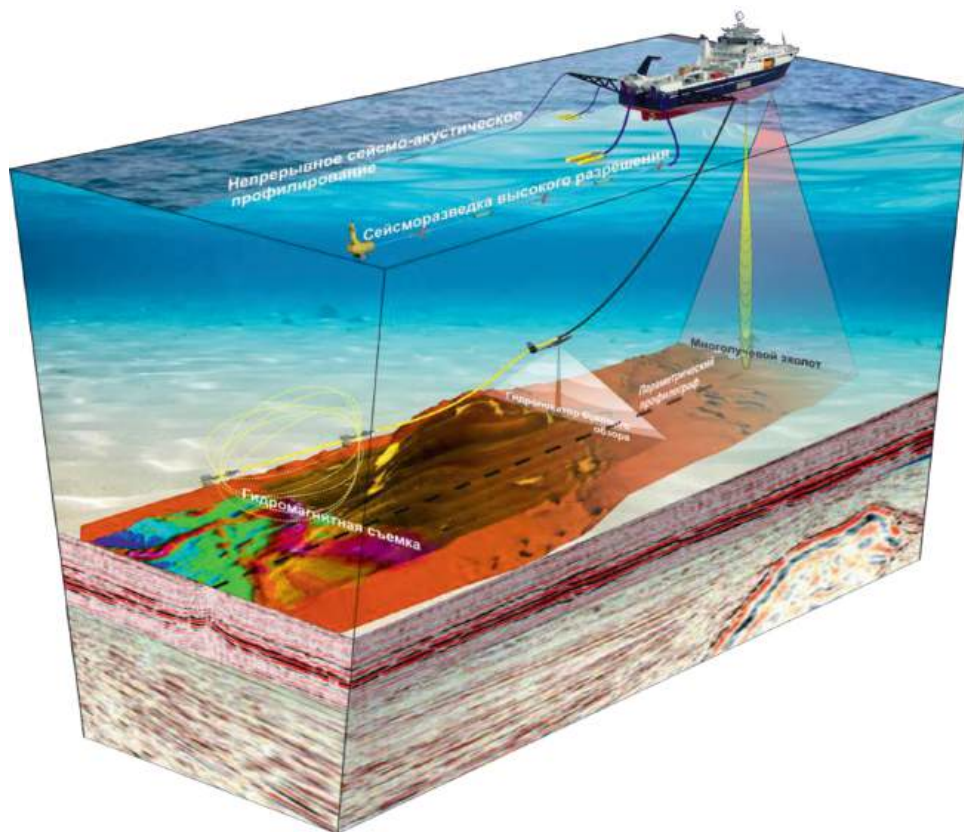
Комплекс геофизических и гидротехнических методов в рамках инженерных изысканий

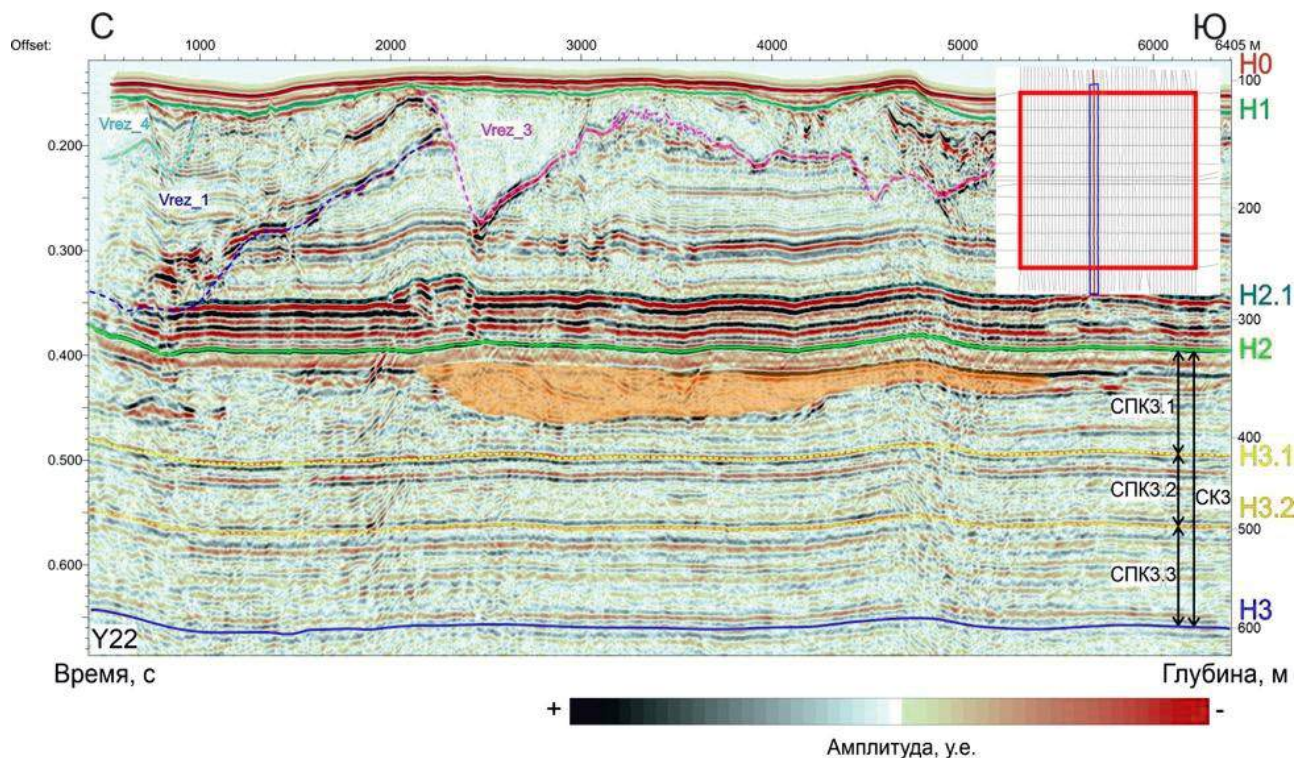
В состав инженерно-геологических изысканий включены разнообразные геофизические исследования, такие как:

- Сейсморазведка высокого разрешения (СВР);
- Высокочастотное (ВЧ) и низкочастотное (НЧ) непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП);
- Электроразведочные работы методом зондирования с помощью заземленных источников (ЗСБ);
- Гидролокация бокового обзора (ГЛБО);
- Гидромагнитная съемка.
- Подводно-технические работы.

Широкий спектр методов позволяет осуществлять комплексный анализ всех имеющихся данных, что в свою очередь повышает достоверность итогового результата (рис. 1).

► Рис. 1.
Схема
буксировки
геофизического
оборудования.





▲ Рис. 2. Пример выделения сейсмических комплексов (СК) по данным СВР. Оранжевым выделен предполагаемый авандельтовый комплекс. На врезке показано положение профиля на участке исследований.

Сейсморазведка высокого разрешения

Главная задача сейсморазведочных исследований высокого разрешения заключается в изучении верхней части разреза, а также выявлении потенциально опасных геологических процессов и явлений, которые могут привести к аварийным ситуациям или катастрофам при проведении эксплуатационного бурения.

Метод СВР направлен на изучение верхней части разреза с целью выявления потенциально опасных геологических процессов. В состав оборудования входят:

- Система регистрации и пневмоисточники: позволяют собирать и обрабатывать сейсмические данные;
- Компрессоры и контроллеры: управляют работой пневмоисточников, обеспечивая качественную регистрацию сигналов.

Сейсмические исследования прово-

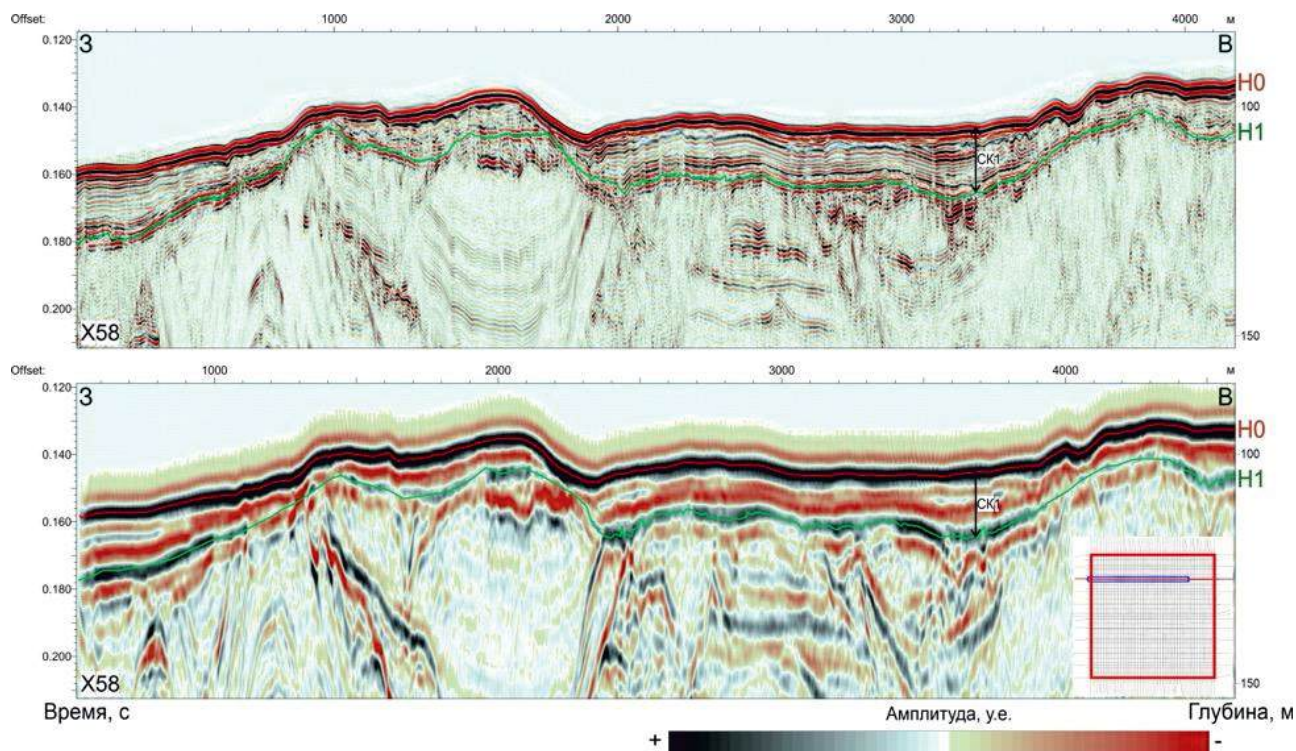
дятся по фланговой системе наблюдений, что позволяет максимально эффективно использовать имеющиеся ресурсы. Контроль качества данных осуществляется в процессе сбора информации с помощью специализированных систем [2-4].

Данными СВР охарактеризована верхняя часть геологического разреза до глубины более 1000 м ниже дна при вертикальной разрешающей способности около 4 м в верхней части разреза до 10 м в нижней (рис. 2).

Непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСАП)

Метод НСАП включает высокочастотное и низкочастотное профилирование. При проведении многоканального НЧ НСАП применяется телеметрическая система, что обеспечивает высокое качество регистрации. Используются следующие элементы:

- Сейсмоакустическая коса: буксирует-



▲ Рис. 3. Пример выделения сейсмического комплекса по данным НЧ НСП (вверху) и СВР (внизу). На врезке показано положение профилей.

ся на определенной глубине, чтобы минимизировать влияние кильватерной струи;

- Источники сигнала: используются для возбуждения сейсмических волн, которые затем регистрируются с помощью косы.

При работе с высокочастотным НСАП используется параметрический профилограф, который крепится к штанге. Система настроена на оптимальные параметры, чтобы обеспечить наилучшее освещение верхней части разреза (рис. 3).

Гидролокация бокового обзора (ГЛБО)

Метод ГЛБО применяется для детального изучения рельефа морского дна и его особенностей. Гидролокатор периодически излучает акустические импульсы и принимает сигналы обратного рассеивания. Для выполнения работ используется двухчастотный гидролокатор, который позволяет получать изобра-

жения дна с высокой разрешающей способностью. ГЛБО устанавливается на судне и погружается на необходимую глубину.

Обеспечение перекрытия между профилями критично для получения качественных данных. Также осуществляется контроль качества данных и их первичная обработка сразу после завершения профилирования.

Гидромагнитная съемка

Гидромагнитная съемка служит для изучения рельефа и определения геологических структур. Используются специализированные магнитометры для регистрации магнитных аномалий, что позволяет выявлять зоны тектонических нарушений и находить полезные ископаемые. Работы проводятся с борта судна с учетом характеристик глубины и рельефа. Данные обрабатываются для получения картографических материалов, необходимых для дальнейшего анализа и принятия решений [5].

Выявление потенциально опасных и неблагоприятных для строительства инженерно-геологических объектов и явлений

Опасные и неблагоприятные геологические объекты и явления, такие как зоны разрывных нарушений, места скоплений свободного газа (газовые карманы), залежи слабых грунтов и погребенные речные врезы, представляют собой серьезную угрозу для состояния инженерных сооружений, экосистем и жизнедеятельности людей. Эти геологические структуры могут вызывать различные негативные последствия, включая аварии и экологические катастрофы. Разрывные нарушения особенно опасны, поскольку они могут приводить к сейсмическим смещениям земной поверхности в районах, где расположены элементы морской нефтегазовой инфраструктуры, и способны вызвать значительные разрушения. Чтобы эффективно выявить и оценить такие угрозы, рекомендуется использовать комплексные методы, включая гидролокацию бокового обзора, многолучевое эхолотирование и сейсморазведку. Эти подходы позволяют достичь наилучших результатов в обнаружении и анализе разрывных нарушений.

Активные разломы, например, могут проявляться в смещениях голоценовых осадков и формировать линейные уступы, что повышает риск возникновения аварийных ситуаций, особенно во время строительных работ на шельфе. Наличие приповерхностного газа и газовых карманов с повышенным пластовым давлением представляет собой потенциальную угрозу, поскольку вскрытие таких карманов при бурении может привести к неконтролируемым газовым выбросам, угрожающим как буровым судам, так и подводным добычным комплексам. В

случае выброса газа в естественных условиях могут образовываться покмарки (газовые кратеры), которые оказывают негативное воздействие на гравитационные и заякоренные буровые платформы, а также могут приводить к провисанию подводных трубопроводов.

Кроме того, газонасыщенные отложения могут проявляться на временных разрезах как резкое увеличение амплитуд отражений с отрицательной полярностью, что связано с увеличением коэффициента отражения. Признаки вертикальной миграции газа к поверхности дна фиксируются в виде струй или локальных пламевидных областей, где наблюдается концентрация газа в отдельных слоях. Это сопровождается возрастанием амплитуд и сменой полярности отражений на сейсмических профилях. Для более полного понимания состояния инженерно-геологических условий также используются активные покмарки, которые могут быть обнаружены как с помощью непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП), так и с использованием гидролокации бокового обзора и многолучевого эхолотирования. Эти методы способствуют повышению безопасности строительства и эксплуатации морских объектов [6-7].

Таким образом, комплексное использование вышеперечисленных методов и тщательный анализ полученных данных являются критически важными для эффективного выявления и оценки потенциальных опасностей. Это знание позволяет минимизировать риски, связанные с проведением инженерных изысканий и строительными работами на шельфе, обеспечивая безопасность как для работников, так и для экосистем, что имеет первостепенное значение в контексте устойчивого развития морских проектов.



▲ Рис. 4. Сводная карта опасностей изучаемой площади изысканий.

В результате работ составляется сводная карта опасностей (рис. 4). На сводную карту вынесены следующие типы опасных и неблагоприятных для строительства геологических процессов, и явлений:

- палеоврезы и палеодепрессии (степень риска – низкая или средняя);
- области распространения предположительно мерзлых грунтов (степень риска – высокая);
- посткриогенные деформации (степень риска – низкая);
- интервалы разреза с повышенной газонасыщенностью (степень риска – низкая);
- разрывные нарушения (степень риска – низкая).

Подводно-технические работы

Континентальные шельфы Арктики и Охотского моря представляют собой стратегически важные территории с уникальными запасами природных ресурсов, включая нефть и газ, обладающими значительным экономическим и энергетическим потенциалом для России. Их освоение требует комплексных

исследований, направленных на анализ состояния подводной инфраструктуры, морских экосистем и устойчивости объектов к экстремальным условиям. Однако суровый климат, ледовая обстановка, низкие температуры и мощные подводные течения создают серьезные вызовы, требующие особого внимания к надежности и безопасности эксплуатационных процессов.

Современные технологии, включая телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА), играют ключевую роль в проведении работ на морских месторождениях в сложных условиях. Эти аппараты обеспечивают визуальный контроль, мониторинг и диагностику подводной инфраструктуры, а также гидрографическую съемку, позволяя оперативно реагировать на возможные аварийные ситуации и снижать риски для технического персонала. Они используются для трассировки трубопроводов, контроля электрохимической защиты, выявления и предотвращения коррозионных и механических повреждений, что способствует увеличению срока службы морских объектов и их стабильной эксплуатации.

Системный подход к применению ТНПА на континентальном шельфе Арктики и Охотского моря позволяет не только оперативно выявлять потенциальные угрозы и контролировать состояние подводной инфраструктуры, но и значительно снижать затраты на профилактический ремонт и модернизацию объектов. В настоящее время такие аппараты широко применяются для сопровождения буровых работ, мониторинга технического состояния подводных нефтегазовых объектов, оценки целостности трубопроводов, выявления утечек и проведения гидрографических исследований.

АО «МАГЭ» обладает многолетним опытом в мониторинге Киринского подводного добычного комплекса в Охотском море, обеспечивая его надежную эксплуатацию. Комплекс ежегодных полевых работ с применением ТНПА включает:

- визуальный осмотр подводных объектов на предмет утечек, повреждений, посторонних предметов, размывов грунта и наносов;
- очистку ключевых узлов и механизмов от биологических обрастаний;
- контроль эффективности электрохимической защиты;
- гидрографическую съемку морского дна, включая гидролокацию бокового обзора и многолучевое эхолотирование;
- сейсмоакустическое профилирование морского дна;
- определение координатных характеристик подводных объектов и их угловых отклонений;
- трассировку линейных объектов, включая контроль заглубления и отклонений от проектного положения;
- экологический мониторинг окружающей среды (отбор проб воды, грунта, газа, биоты).

В рамках своей деятельности АО «МАГЭ» активно использует телеуправляемый необитаемый подводный аппарат Sub-Fighter 15K, предназначенный для мониторинга, инспекции и диагностики подводной инфраструктуры, включая трубопроводы, платформы и подводные скважины. Этот аппарат способен работать на глубинах до 1500 метров, обеспечивая качественную визуализацию благодаря современным камерам и системе освещения. Высокая маневренность и точность управления позволяют использовать его в сложных подводных условиях, в том числе в зонах с неровным рельефом дна и ограниченным пространством (рис. 5).

Одним из ключевых преимуществ Sub-Fighter 15K является его модульная конструкция, позволяющая адаптировать аппарат под широкий спектр задач за счет оснащения различными инструментами и датчиками. В зависимости от требований эксплуатации на него могут устанавливаться гидравлические манипуляторы, эхолоты, гидролокаторы бокового обзора, системы определения планово-высотного положения и другие специализированные устройства. Это делает Sub-Fighter 15K универсальным средством для выполнения различных

▼ Рис. 5. ТНПА Sub-Fighter 15K.



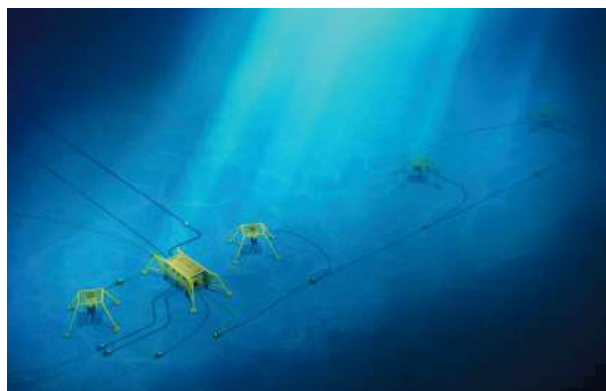
видов подводных работ — от визуального осмотра и очистки конструкций от биологических обрастаний до проведения экологического мониторинга и контроля электрохимической защиты.

АО «МАГЭ» применяет Sub-Fighter 15K для обследования подводной инфраструктуры в акватории Охотского моря, включая Киринский подводный добычный комплекс. Аппарат регулярно проводит инспекцию трубопроводов и других подводных сооружений, выявляет дефекты и оценивает состояние конструкций, что позволяет своевременно выполнять профилактические и ремонтные работы. Использование Sub-Fighter 15K обеспечивает оперативное получение точных данных о состоянии подводных объектов, минимизируя риски аварий и повышая надежность эксплуатации морских объектов в сложных климатических условиях.

Таким образом, применение Sub-Fighter 15K в деятельности АО «МАГЭ» значительно повышает эффективность и безопасность подводных операций, позволяя поддерживать высокий уровень качества работ на континентальном шельфе Арктики и Охотского моря (Рис. 6).

АО «МАГЭ» на протяжении многих лет успешно использует технологии подводного мониторинга и диагностики на

▼ Рис. 6. ТНПА Sub-Fighter 15K на борту судна во время выполнения полевых работ.



▲ Рис. 7. Подводный добычный комплекс Киринского месторождения.

Киринском подводном добычном комплексе (ПДК). Этот комплекс представляет собой высокотехнологичную систему добычи углеводородов, функционирующую в сложных подводных условиях. Его ключевые особенности включают высокий уровень автоматизации, способность работать в экстремальных климатических условиях, а также интеграцию передовых технологий, направленных на повышение безопасности и эффективности разработки месторождения (Рис. 7).

Киринский ПДК оборудован современными системами, обеспечивающими непрерывный мониторинг технического состояния оборудования и подводной инфраструктуры. АО «МАГЭ» проводит комплексные обследования устьев скважин, контролируя состояние объектов обустройства и гарантируя их безопасную эксплуатацию.

По итогам работ по оценке состояния подводной газовой инфраструктуры выявлены следующие проблемы:

- большое количество посторонних объектов на акватории вследствие активной хозяйственной деятельности;
- ускоренное истощение жертвенных анодов, что повышает риск коррозии;
- многочисленные нарушения лакокрасочного покрытия (ЛКП);
- высокая скорость литодинамических процессов, вызывающая образование

новых свободных пролетов, размывы оснований опор и увеличение механических нагрузок на конструкции;

- затруднение доступа к элементам маркировки и технологическим надписям из-за активного биологического обрастания.

При выполнении работ в Охотском море АО «МАГЭ» сталкивается с дополнительными трудностями:

- активное судоходство и строительные работы на акватории часто вынуждают корректировать график выполнения задач;
- отсутствие нормативно-правовой базы для выполнения подводного обследования приводит к необходимости частых согласований и изменения методик, что усложняет работы.

Деятельность АО «МАГЭ» на Кирином ПДК выходит за рамки стандартного мониторинга. Специалисты компании проводят комплексные обследования, оценивая влияние внешних факторов на состояние подводной инфраструктуры. В рамках этих исследований анализируются литодинамические процессы, уровень коррозии, состояние лакокрасочного покрытия и жертвенных анодов. Кроме того, высокая концентрация посторонних объектов в акватории требует постоянного совершенствования методик и подходов к проведению обследований.

Выводы

В ходе анализа потенциально опасных и неблагоприятных для строительства инженерно-геологических объектов и явлений на шельфе выделяются ключевые аспекты, касающиеся их влияния на безопасность и устойчивость морских инженерных сооружений. Опасные геологические процессы, такие как разрывные нарушения, газовые карманы и слабые грунты, могут привести к серь-

езным аварийным ситуациям в процессе бурения и эксплуатации инфраструктуры.

Современные методы, включая гидролокацию бокового обзора (ГЛБО), многолучевое эхолотирование и сейсморазведку, играют важную роль в выявлении и оценке этих объектов, что позволяет минимизировать риски и повысить уровень безопасности. Разработка эффективных подходов к геоэкологическим исследованиям и внедрение новейших технологий дают возможность оперативно реагировать на потенциальные угрозы, обеспечивая надежность и безопасность инженерных решений.

Важность комплексного подхода к исследованию геологических условий, использование новейших методик и технологий, а также постоянный мониторинг состояния окружающей среды – это ключевые факторы, способствующие успешному проведению морских строительных работ и предотвращению аварийных ситуаций. В этом контексте значительный вклад в обеспечение безопасности подводной нефтегазовой инфраструктуры вносит многолетний опыт АО «МАГЭ» по инспектированию объектов в Охотском море.

Применение телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА), в частности Sub-Fighter 15K, позволило существенно повысить точность мониторинга, снизить риски для технического персонала и обеспечить безопасное выполнение работ в сложных климатических условиях. В ходе анализа состояния Кириного подводного добычного комплекса (ПДК) специалисты АО «МАГЭ» выявили ряд проблем, включая ускоренное истощение анодов, повреждения защитных покрытий и негативное влияние литодинамических процессов. Данные факторы подчеркивают необхо-

димось постоянного мониторинга и профилактических мероприятий для предотвращения аварий и продления срока службы подводных объектов.

Несмотря на сложности, связанные с отсутствием нормативно-правовой базы и интенсивным судоходством, специалисты АО «МАГЭ» продолжают успешно выполнять поставленные задачи, применяя комплексный подход, включающий визуальный осмотр, контроль электрохимической защиты и экологический мониторинг. Опыт компании в использовании ТНПА на Киринском ПДК является примером эффективного внедрения современных технологий для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации подводной нефтегазовой инфраструктуры в условиях Арктики и Охотского моря.

Эффективное применение данных методов не только защищает объекты и экосистемы, но и обеспечивает безопасность жизни людей, что является первоочередной задачей в сфере морского строительства и освоения шельфовых ресурсов.

Литература

1. Базилевич С.О., Казанина М.А., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А, Кочетов М.В., 2024. Комплекс методов для изучения потенциально опасных геологических процессов при разведке и обустройстве нефтегазовых месторождений Южно-Карского шельфа. Газовая промышленность, 2024, № 2(861), с. 28-34.
2. Базилевич С.О., Казанина М.А., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А, Кочетов М.В., 2023. Разработка и внедрение методики высокоточных гидромагнитных и набортных гравиметрических исследований при инженерных изысканиях на шельфе. Приборы и системы разведочной геофизики, 2023, №4 (79), с. 32-38.

3. Базилевич С.О., Казанина М.А., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А, Кочетов М.В., 2024. Эффективность высокоточных гравимагнитных наблюдений при проведении инженерно-геологических изысканий. Деловой журнал Neftegaz.RU, 2024, № 3(147), с. 64-70.

4. Базилевич С.О., Казанина М.А., Кочетов М.В., Жилин Ф.Е., Шепелев А.А., 2023. Высокоточные гидромагнитные и набортные гравиметрические исследования при инженерных изысканиях на шельфе. Гелиогеофизические исследования. 2023, № 41, с. 27-33.

5. Казанин А.Г., Шепелев А.А., Коснырева М.В., Жилин Ф.Е., Демонов А.П., Кочетов М.В., 2023. Комплексирование данных сейсморазведки и магниторазведки при анализе палеоврезов и палеопонижений шельфа Карского моря. Приборы и системы разведочной геофизики, 2023, №3 (78), с. 131-139.

6. Кочетов М.В., Шепелев А.А., Челышев С.В., 2023. Возможности набортных гравиметрических и гидромагнитных исследований при решении инженерно-геологических задач на шельфе. Вестник Московского университета, серия 4 геология, 2023, № 3, с. 88-97.

7. Шепелев А.А., Жилин Ф.Е., Демонов А.П., 2021. Эффективность выполнения гидромагнитных градиентометрических исследований с использованием магнитовариационной станции при инженерно-геологических изысканиях на континентальном арктическом шельфе. Инженерные изыскания, 2021, Т. 15, № 3-4. с. 32-41.