

ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОРСКОГО БУРЕНИЯ, ВЫПОЛНЯЕМОГО С ЦЕЛЬЮ РАЗВЕДКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОБАЛЬТОНОСНЫХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ КОРОК

Пуляева И.А.¹, Мирисматов Д.У.¹, Миноранский Д.Е.¹,
Григорчук А.В.², Михайлов Д.И.², Кучеров К.П.²

¹ГНЦ АО «Южморгеология», ²ООО ГИКО

pulyaeva09mail.ru

Кобальтоносные железомарганцевые корки (КМК) являются одним из видов минеральных ресурсов Мирового океана, промышленная добыча которых планируется в ближайшем будущем.

АО «Южморгеология» проводит геологоразведочные работы (ГРР) на КМК в рамках 15-ти летнего Контракта, заключенному 10 марта 2015 г. между Международным органом по морскому дну и Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации, в Российском разведочном районе (РРР-КМК), расположенном на гайотах Магеллановых гор: Говорова, Вулканолог, Коцебу и Альба [1].

К началу 2025 года на площади РРР-КМК завершены геологоразведочные работы оценочной стадии, в ходе проведения которых, выполнено картирование океанического дна, геоакустическое и фототелевизионное профилирование, геологическое опробование методом бурения неглубоких скважин (в общей сложности пробурено 411 скважин) и драгирования.

По результатам работ получена обширная практическая и научная информация по условиям локализации КМК, выделены и о контурены рудные залежи, намечены наиболее перспективные участки для проведения разведочных работ.

На разведочной стадии, в оставшийся пятилетний период контрактных работ, с целью оценки промышленного потенциала месторождений КМК, предусматривается геологическое опробование методом бурения неглубоких скважин на участках с простыми, доступными для бурения горно-геологическими условиями, составляющими 45 % рудной площади РРР-КМ. Суммарные объемы буровых работ с учетом уже пробуренных скважин составят порядка 1100 скважин.

Увеличение масштабов геологического опробования методом бурения и специфика производства работ с борта судна, требуют комплексного подхода к организации и выполнению морских буровых работ с учетом факторов, обеспечивающих эффективность их проведения.

Опыт буровых работ на гайотах Магеллановых гор, так же, как и бурение разведочных скважин на шельфе [2], показывают, что на эффективность процесса бурения скважин с борта судна влияют естественные, технические и технологические факторы.

К **естественным факторам**, оказывающим существенное влияние на организацию буровых работ с борта судна, относятся гидрометеорологические и горно-геологические условия.

В группу **гидрометеорологических условий**, которые могут снизить эффективность морского бурения, входят такие характеристики морской среды как волнение поверхности океана и скорость ветра.

Гидрометеорологические наблюдения, выполняемые в каждом экспедиционном периоде деятельности, показывают, что в летний период повторяемость волнений от 2 до 4 баллов составляет 90 % (Hs от 0,1 до 2,5 м), пяти (Hs от 2,5 до 4,0 м) и шести бальных волнения (Hs от 4,0 до 6,0 м) не превышают 10 %. Скорость ветра изменяется от 0 до 8 см/с, при среднем значении 6 см/с. В весенний период повторяемость волнений от 2 до 4 баллов составляет 43 %, повторяемость волнений от 5 до 6 баллов достигает 55 %. Зимний и осенний периоды, при повторяемости пяти и шести бальных волнений до 85 % и 71 %

соответственно, средней скорости ветра 13 см/с (при размахе от 1 до 25 см/с), наименее благоприятны для проведения буровых работ с борта судна.

Сложные гидрометеорологические условия (длинные, боковые волны, высотой более 4 м, порывы ветра до 25 см/с) затрудняют выполнение спускоподъемных операций бурового оборудования и удержание судна в заданной позиции. Кроме того, постановка на дно бурового комплекса в условиях качки судна сопровождается значительными ударно-динамическими нагрузками, которые приводят к поломке оборудования (нарушению контактов электрических соединений, штатного положения бурового инструмента в кассете, деформации защитного элемента подшипника и др.).

Снижение аварийности, при выполнении буровых работ в сложных гидрометеорологических условиях, возможно в случае установки на судне стабилизаторов качки, интегрированных с системой динамического позиционирования, использование которых повысит точность позиционирования судна, снизит вибрационные нагрузки, обеспечит безопасность работ и сократит время на проведение операций.

Горно-геологические условия (ГГУ) играют важную роль в планировании и проведении морского бурения на гайотах подводных гор, характеризующихся сложным геолого-геоморфологическим строением, что требуют тщательного предварительного изучения района работ.

Перед началом геологического опробования методом бурения выполняются следующие виды работ: картирование дна с использованием придонного многолучевого эхолота, геоакустическая съемка и фототелевизионное профилирование. На основе интерпретации цифровых моделей рельефа дна определяются абсолютные отметки глубин и углы уклонов. По данным дешифрирования материалов фотопрофилирования оцениваются расчлененность мезорельефа покровов корок, степень их дезинтеграции и степень присыпанности рыхлыми осадками.

С учетом обобщающих характеристик факторов, связанных с рельефом и условиями залегания корок, горно-геологические условия классифицированы по степени сложности на простые (мезорельеф ровный, низкой степени расчлененности, уклоны дна до 15°, присыпанность рыхлыми осадками до 40 %), средней сложности (мезорельеф расчлененный, уклоны дна от 15° до 20°, присыпанность от 40 % до 60 %) и сложные (мезорельеф сильной степени расчлененности, уклоны дна более 20°, присыпанность более 60 %).

Сложные горно-геологические условия значительно увеличивают риски и продолжительность операций. Постановка бурового комплекса на участки с расчлененным рельефом с уклонами дна более 15° может привести к опрокидыванию установки. При проведении буровых работ на участках со сложными условиями локализации руд, как правило, увеличиваются затраты времени на поиск площадок с благоприятными условиями для проходки скважин.

Для снижения рисков при проведении буровых работ и оптимизации временных затрат на основе комплексной интерпретации материалов батиметрической съемки, геоакустического и фототелевизионного профилирования выполняется районирование исследуемой площади по сложности горно-геологических условий, на базе которого осуществляется выбор проектных буровых площадок.

Для каждой станции бурения составляется схема постановки бурового комплекса на дно (выделяется участок устойчивого развития покровов корок, примерно 5 фотокадров подряд, задается начальная точка постановки и азимут смещения в случае неблагоприятных условий для отработки станции при заходе в заданную точку). При этом учитываются уклоны дна и условия локализации корок, прежде всего, степень расчлененности покровов КМК и степень присыпанности рыхлыми осадками.

По материалам геологической изученности на основе геологической карты и карты мощности корок, имеющих на соответствующий участок, составляются предварительные проекты скважин, включающие данные об ожидаемой мощности рудного слоя и типе пород

субстрата. Для выбора рационального породоразрушающего инструмента и технологии проходки скважин систематизируются данные по физико-механическим свойствам рудных образований и горных пород, выделяются группы пород по категории буримости [3].

Опыт проведенных работ показывает, что наиболее благоприятными участками для отработки станций бурения являются периферийные части вершинных поверхностей гайотов (диапазон глубин от 1100 до 2000 м), террасовидные уступы прилегающих склонов и гребневые поверхности отрогов (диапазон глубин от 2000 до 3500 м), в пределах которых доминируют участки с уклонами дна до 15° , характеризующиеся доступными для бурения горно-геологическими условиями (покровы корок ненарушены, со слабой и средней степенью расчлененности, незначительной степенью присыпанности рыхлыми осадками).

Склоны гайотов с углами уклонов дна более 15° , характеризующиеся расчлененным мезорельефом покровов корок и относящиеся к областям повышенной сложности менее благоприятны для проведения буровых работ. Геологическое опробование на этих участках проводится, как правило, с использованием скальной драги.

На площади гайотов РРР-КМК субстратом корок являются различные генетические типы пород, имеющие разную степень прочности [4], которая определяет категорию буримости, влияющую на скорость проходки.

Сравнение параметров проходки скважин с полученными геологическими разрезами показало, что рудный разрез в среднем проходится со скоростью 2,0-2,5 см/мин, при этом скорость проходки по коркам молодой генерации (III-IV категории буримости) может варьировать в пределах от 2,0 до 5,0 см/мин (при средних значениях от 2,5 до 3,5 см/мин), средняя скорость проходки по коркам древней генерации (IV-V категории буримости) составляет 1,5 см/мин.

При входе в субстрат высокой категории буримости (эффузивные породы, мраморизованные известняки VII - IX категории буримости), скорость проходки замедляется и в среднем составляет 0,8 см/мин, увеличиваются затраты времени, возрастает износ оборудования, процесс бурения сопровождается частыми заклиниваниями бурового снаряда, приводящими к разрушению керна.

При проходке по субстрату низкой категории буримости (известняки планктоногенные, сильно выветрелые слаболитифицированные вулканокластиты III, IV категории буримости), скорость проходки увеличивается и может достигать 5-7 см/мин. В некоторых случаях, слабо литифицированный субстрат (содержащий глинистую составляющую) в процессе бурения налипает на режущие элементы буровой коронки, насос, обеспечивающий удаление шлама водой, не успевает эффективно вымывать разрушенную породу, что приводит к вынужденной остановке бурения для очистки инструмента.

Технические факторы, влияющие на эффективность буровых работ, определяются конструктивными особенностям и техническими характеристиками используемых буровых установок и сопутствующего судового оборудования, обеспечивающего удержание судна в точке бурения, энергоснабжение процесса бурения, выполнение спускоподъемных операций и др.

Буровые работы в пределах РРР-КМК выполняются с борта НИС «Геленджик» оснащенного *системой динамического позиционирования* NAVIS NavDP 4000, которая предназначена для управления судном в различных погодных условиях и удержания его в заданной позиции над точкой бурения в течении длительного периода времени. Система использует подруливающие устройства (трастеры) и GPS-датчики для корректировки положения судна. Точность позиционирования от 0.5 до 3 м (в зависимости от условий): стандартные условия ($H_s < 2,5$ м) - точность удержания ± 1 м, сложные условия ($H_s 2.5-4$ м) - точность снижается до ± 3 м, возникает риск временного сбоя при боковом волнении. Волны высотой более 4 м являются критическими для работы системы DP. Длительная работа в штормовом режиме может вызвать срыв позиции (drift-off), вывести судно из

радиуса удержания (Position Keeping Radius), привести к перегрузу двигателей и выходу из строя оборудования.

Энергоснабжение процесса бурения осуществляется от судовой энергетической системы через установленный на борту повышающий трансформатор (3×380 В – 3×1500 В), силовую линию кабель-троса (КГ(3х4,0+3х1Е)-240-60) и понижающий трансформатор (3×1500 В – 3×380 В) буровой установки. Основные риски при энергообеспечении буровых работ связаны с колебаниями напряжения/частоты в судовой сети и целостностью силовой и оптоволоконной линий грузонесущего кабель-троса. Для минимизации рисков, связанных с колебаниями напряжения/частоты, необходимо использовать стабилизаторы напряжения и индивидуальные блоки питания, установленные на борту судна. Работоспособность силовой и оптоволоконных линий кабеля троса зависят от его технических характеристик, таких как нагрузка на разрыв и пороговое напряжение пробоя изоляции

Для осуществления *спускоподъемных операций* (СПО) бурового оборудования используются транзитная лебедка (drawworks) JM20M (и/или 6-ти моторная лебедка DLC-120) и грузонесущий кабель КГ(3х4,0+3х1Е)-240-60. Основные риски при проведении СПО связаны с отказом системы управления (выход из строя электронных, электрических компонентов), со сбоем работы кабелеукладчика (используется трос другого диаметра), обрывом кабель-троса в результате динамических перегрузок из-за качки судна, из-за усталости троса и др.

Для минимизации рисков, предотвращения аварийных ситуаций, необходимо использовать сертифицированный (по допустимой нагрузке и электрическим параметрам) грузонесущий кабель, перед спускоподъемной операцией проводить визуальный осмотр целостности оболочки, замер сопротивления изоляции, при потере гибкости на 30 % и видимых повреждениях брони необходимо производить замену.

Инженерно-техническое обеспечение буровых работ на этапе поисково-оценочных работ осуществлялось буровой установкой GBU-1/4000, разработанной по проекту Государственного научно-производственного предприятия “Севморгеология”. Установка обеспечивала бурение одной скважины за одну спускоподъемную операцию, электропитание осуществлялось от аккумуляторов, производительность буровых работ, с учетом подзарядки аккумуляторов, составляла не более трех станций в сутки. В период с 2013 по 2019 гг. установкой GBU-1/4000 пробурено 166 скважин.

В 2019 г. на борт НИС «Геленджик» поступила буровая установка кассетного типа МГБУ-К, разработанная специалистами ООО «ГИКО» по договору № 739/17 от 25.12.2017 г. Буровой комплекс МГБУ-К обеспечивает бурение с отбором керна до четырех скважин диаметром 112 мм по породам IV-XII категории буримости на глубину до 1 м, без промежуточного подъема на борт судна. Основные технические характеристики установки:

- гидравлический привод механизма, мощность агрегата 11 кВт с возможностью увеличения до 22 кВт в зависимости от возможностей судна-носителя;
- электропитание с борта судна, обеспечивающее временной отрезок пребывания МГБУ-К под водой, необходимый для отработки четырех циклов бурения;
- встроенные камеры, обеспечивающие мониторинг процесса в режиме реального времени с возможностью записи на электронный носитель;
- система горизонтирования (состоящая из трех гидроцилиндров - аутиригеров), позволяющая устанавливать буровую установку как на выравненных площадках, так и на склонах разной степени расчлененности, крутизной до 15 ° градусов, с последующим выравниванием относительно горизонта;
- связь с МГБУ-К осуществляется через комплекс управления, на дисплее которого в процессе бурения отображаются следующие параметры: давление и температура масла в системе, мощность (потребляемая гидравлическими приводами), напряжение и сила тока (потребляемые установкой), глубина проходки, частота вращения бурового инструмента, скорость проходки.

В качестве технологического бурового инструмента для бурения скважин диаметром 112 мм используется буровой снаряд, состоящий из буровой колонны, кернорвательного устройства, алмазного породоразрушающего инструмента (импрегнированная коронка 28ИЗГ для пород IX - XI категорий по буримости) взаимно унифицированных по соединительным элементам и диаметрам.

В период с 2020 по 2025 гг. буровой установкой МГБУ-К пробурено 247 скважин. В целом, опыт проведенных работ показывает, что буровая установка кассетного типа (МГБУ-К) имеет высокий потенциал для выполнения производственных объемов по бурению скважин на разведочной стадии. Общая производительность МГБУ-К при проведении геологического опробования может составлять от 4 до 9 станций в сутки.

На производительность буровых работ, по мимо естественных факторов (метеопростои занимают 12,2 % производственного цикла), существенное влияние оказывают технические аспекты, связанные с необходимостью проведения в процессе морского бурения профилактических и ремонтных работ бурового и сопутствующего судового оборудования (ремонтные работы занимают 21,2 % производственного цикла).

К *технологическим факторам*, влияющим на эффективность проведения буровых работ, относятся технологические приемы проходки скважин по породам различной категории буримости.

Наиболее сложными для разбуривания являются разрезы, в основании которых находятся прочные монолитные породы VII - IX категории буримости (эффузивные породы, мраморизованные известняки), проходка по ним осуществляется с более низкой скоростью, сопровождается частыми заклиниваниями бурового инструмента, приводящим к разрушению керна и получению некондиционного разреза.

Частичной, либо полной потерей керна сопровождается бурение скважин, вскрывающих рудные разрезы, залегающие на непрочных, слабосцементированных породах III-IV категории буримости, разрушающиеся под воздействием промывочной жидкости (известняки планктоногенные, сильно выветрелые слаболигифицированные вулканокластиты).

Для повышения эффективности буровых работ (выхода керна и его сохранности) при проходке скважин по породам различной категории буримости рекомендуется использовать следующие технологические приемы:

- при прохождении монолитных, слаботрещиноватых пород высокой категории буримости (не размывающихся промывочной жидкостью) применять тактику удержания частоты вращения бурового инструмента в узком диапазоне, перед подъемом колонковой трубы керн тщательно заклинивать кернозахватными элементами, либо использовать технологию заклинивания керна путём затирки, при которой последние 5 см проходки осуществлять без промывки с повышенной осевой нагрузкой на забой;

- при бурении разрушающихся и размывающихся пород ограничивать интенсивность промывки, перед подъемом колонковой трубы производить затирку керна «всухую». Перед окончанием бурения резко увеличивать скорость вращения бура, бурение продолжать без промывки до заклинивания бурового снаряда с целью формирования «пробки» на забое скважины.

В заключении необходимо отметить следующее. Морское бурение, выполняемое с целью разведки месторождений КМК, сложный технологический процесс, выполняемый под воздействием внешних факторов и сочетающий в себе совокупность работы судовых систем и бурового оборудования. Ключевые условия для успешного и эффективного морского бурения перечислены ниже.

1. **Техническая готовность судового оборудования**, обеспечивающего возможность устойчивого позиционирования судна в точке бурения (при совместной работе носового и кормового подруливающих устройств), выполнение энергоснабжения процесса бурения и спускоподъёмных операций (в том числе наличие сертифицированного грузонесущего кабеля заданной длины и электрических параметров). Для повышения

эффективности морского бурения и снижения рисков при выполнении работ с борта судна в сложных гидрометеорологических условиях, необходимо предусмотреть возможность установки на судне стабилизаторов качки, интегрированных с системой динамического позиционирования.

2. Техническая оснащенность оборудованием, используемым для инженерно-технического обеспечения буровых работ: 1) наличие как минимум двух буровых установок кассетного типа (основной и запасной), укомплектованных запасными частями, инструментами и принадлежностями необходимыми для ремонта и обслуживания оборудования; 2) наличие буровых комплектов с колонковыми трубами, алмазными коронками и кернорвательными кольцами, взаимно унифицированных по соединительным элементам и диаметрам.

3. Метеорологические условия. Наиболее благоприятными для проведения буровых работ с борта судна являются весенний и летний периоды, менее благоприятными – осенний и зимний. Проведение работ в сложных гидрометеорологических условиях может привести к выходу из строя исполнительных механизмов: подруливающих устройств, оборудования для спускоподъемных операций, бурового оборудования.

4. Геоморфологические и горно-геологические условия. Перед началом геологического опробования методом бурения необходимо проведение тщательного изучения района работ, включающего: 1) батиметрическую съемку, геоакустическое и фототелевизионное профилирование; 2) выбор проектных буровых площадок с учетом рельефа дна и горно-геологических условий; 3) составление предварительных проектов скважин, включающих данные об ожидаемой мощности рудного слоя и типе пород субстрата; 4) изучение физико-механических свойств рудных образований и горных пород, с выделением групп по категории буримости.

5. Технологические требования. Быстрая адаптация к изменению геологических условий, использование определенных технологических приемов при проходке скважин по породам различной категории буримости с целью повышения выхода керна и его сохранности.

Список литературы

1. Пономарева И.Н. и др. Геологоразведочные работы на месторождении кобальтоносных железомарганцевых корок в пределах Российского разведочного района Магеллановых гор Тихого океана: история и результаты исследований // Океанологические исследования. 2023. No 51(4). С. 135–166
2. Асеев А.Г., Распопов В.М., Хворостовский С.С. Бурение разведочных скважин на шельфе // М.: Недра, 1988. — 197 с.
3. Сборник 3.2. Инженерно-геологические изыскания. МРР-3 .2.02-23
4. Melnikov M.E., Pulyaeva I.A., Sedysheva T.E., Ivanov V.V. Physical and mechanical properties of Fe-Mn crusts and their underlying rock substrates // *46th Underwater Mining Conference 24-29 September 2017*