

## ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБУСТРОЙСТВА АКВАТОРИАЛЬНОЙ ЧАСТИ КРУЗЕНШТЕРНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В КАРСКОМ МОРЕ

**А. Д. Дзюбло**

ФГБУН Институт проблем нефти и газа РАН, ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

**К. В. Алексеева**

ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 31 октября 2019 г.

*Инженерные изыскания необходимы для получения данных о рельефе дна, глубине моря, характеристике инженерно-геологических, гидрометеорологических и ледовых условий, которые впоследствии помогут выбрать способы и технические средства для поисково-разведочного бурения, а также позволят произвести необходимые расчеты для постановки буровой установки на детальную площадку. В результате инженерных изысканий на Крузенштернском месторождении выявлены опасные физико-геологические явления: наличие мерзлых пород в разрезе на глубинах от 50 до 200 м, возможное наличие интервалов аномально высокого пластового давления. При этом наиболее опасными с этой точки зрения являются интервалы, приуроченные к подошве многолетнемерзлых пород.*

**Ключевые слова:** Крузенштернское месторождение, мелководный шельф, инженерно-геологические изыскания, геокриологические условия, приповерхностные интервалы аномально высокого пластового давления, газовые ресурсы.

### Введение

В связи с истощением крупнейших месторождений суши все более значительное внимание и практический интерес вызывают освоение газовых ресурсов континентального шельфа Арктики, в том числе Западно-Ямальского. Здесь в Карском море открыты крупнейшие месторождения Русановское, Ленинградское, Нярмейское и выявлены перспективные структуры (Шараповская, Белоостровская и др.), на которых в последние годы ПАО «Газпром» ведет поисково-разведочные работы [1].

Особый интерес представляет Крузенштернское газоконденсатное месторождение на западе Ямала, где уже проведено бурение поисково-разведочных скважин на суше и установлена промышленная газоносность альб-сеноманских и аптских отложений. Запасы газа этого месторождения составляют около 1,6 трлн м<sup>3</sup>. Его характерной особенностью явля-

ется расположение площади продуктивных пластов не только на суше, но и в акватории моря (площадь в акватории составляет около 700 км<sup>2</sup>).

Для арктического шельфа характерны следующие инженерно-геологические процессы и явления, способные существенно затруднить проведение работ: многолетнемерзлые породы, слабые грунты в верхней и средней частях геологического разреза, высокая интенсивность осадконакопления и скорость движения придонных наносов [2].

Освоение Крузенштернского месторождения с учетом его расположения и природно-климатических условий — сложная техническая задача. Основные трудности: суровый арктический климат, короткий навигационный период (два-три месяца), малая глубина моря. Инженерно-геологические условия на предельно мелководном Приямальском шельфе влияют на выбор технических средств для поисково-разведочного бурения, обустройство и эксплуатацию месторождения.

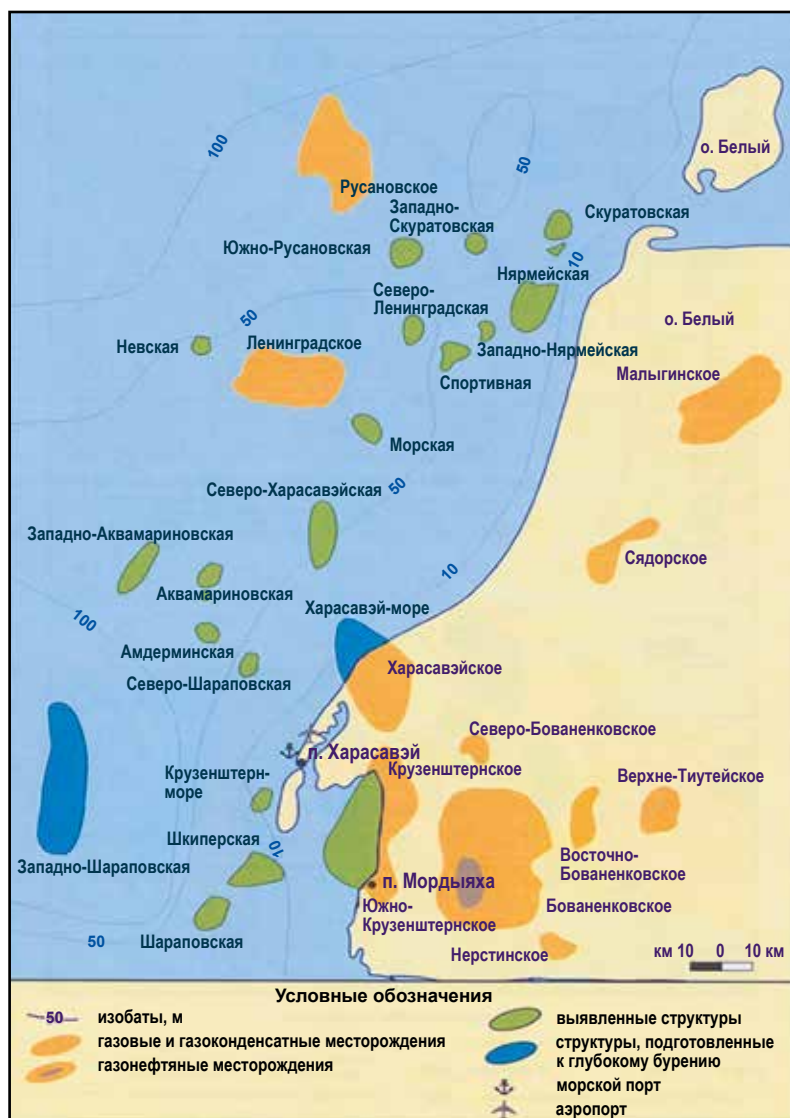


Рис. 1. Обзорная схема Приямальского шельфа Карского моря и прилегающей суши  
 Fig. 1. Overview of the Priyamal shelf of the Kara Sea and adjacent land

Выполненный авторами анализ мирового опыта освоения месторождений углеводородов в аналогичных природно-климатических условиях показал, что возможны следующие основные варианты освоения Крузенштернского месторождения: ледовый искусственный остров, ледостойкий грунтовый искусственный остров, освоение путем бурения наклонно-направленных, горизонтальных скважин с берега [3].

Главной целью исследований является инженерно-геологическое обоснование выбора вида обустройства и технологии бурения разведочных скважин в акваториальной части Крузенштернского месторождения. Полученные данные о рельефе дна, глубине моря, характеристике инженерно-геологических, гидрометеорологических и ледовых условий необходимы для принятия проектных решений по освоению месторождения.

### Характеристика объекта исследований

Крузенштернское газоконденсатное месторождение — уникальный проект, учитывающий проблемы строительства в сложнейших геокриологических условиях Ямала и проблемы освоения шельфа замерза-

ющих арктических морей. Месторождение расположено в северо-западной части полуострова Ямал на побережье залива Шарапов Шар (рис. 1).

Литолого-стратиграфический разрез Западно-Ямальского шельфа Карского моря, где расположено Крузенштернское месторождение, характеризуется наличием мощной толщи меловых песчаноглинистых пород и антиклинальных ловушек с высокими коллекторскими свойствами (рис. 2).

Выделенные стратиграфические подразделения вскрыты глубокими скважинами на суше в западной части Ямала на месторождениях Бованенковском, Харасавэйском, Крузенштернском (доюрские образования, породы юры, неокома) и на акватории Приямальского шельфа на месторождениях Рusanовском, Ленинградском, Крузенштернском, Харасавэйском (мел, палеоген), где пробурено 11 морских поисково-разведочных скважин.

Верхний готерив-баррем-аптский комплекс (танопичинская свита) является одним из основных продуктивных комплексов на месторождениях Ямала. В этих отложениях выделено девять пластов на Крузенштернском месторождении, при этом наиболее значимые по запасам залежи приурочены к его верхней части. Однако 73% общих запасов месторождения сосредоточено в сеноманской залежи. Поэтому основным объектом проектирования разработки и освоения служит сеноманская залежь, расположенная в основном в море.

Бурение с берега со значительным отходом скважины более 5 км на глубину залегания сеноманской залежи (666—798 м) технически трудно реализуемо (размыв берега, сползание конструкций в море), и такой способ освоения дает возможность разработки лишь ограниченной части прибрежной полосы залежи.

Проблемы освоения Крузенштернского месторождения заключаются также в том, что значительная часть берега залива

Возраст		Литология	Мощность, м	Свита, описание	Газ на шельфе
<b>ПАЛЕОГЕН-ЧЕТВЕРТИЧНЫЙ</b>			299—435	Глины и алевроиты, пески, гравий	
<b>ВЕРХНИЙ МЕЛ</b>	Маастрихт		140	Ганькинская — глины, алевроиты	
	Коньяк-сантон-компан		470—567	Березовская. Верх — глины с прослойками алевроита и песчаников. Низ — опоки, опоковидные глины, силициты	
	Турон		63—79	Кузнецовская — глины	
	Поздний альб-сеноман		490,8—700	Марресалинская — чередование песчаных, песчано-алевритовых аркозовых и алевро-пелитовых пород. Углистые прослои	
<b>НИЖНИЙ МЕЛ</b>	Нижний-средний альб		115—186,8	Яронгская — аргиллиты с прослоями песчаников	
	Верхняя часть готерива-баррем-апт		500—950	Танопчинская — неравномерное прослаивание аркозовых песчаников, алевролитов и аргиллитов	
	Барриас-валанжин-начало готтерива		460—1200	Ахская — клиноформные песчано-глинистые образования. Верх — аргиллиты часто битуминозные, низ — терригенные и глинистые породы с прослоями глинистых известняков	
<b>ЮРА</b>	Титон		8—10	Баженовская — аргиллиты	
	Кимеридж-оксфорд-келловей		65—82	Абалакская — аргиллиты	
	Бат		70—220	<b>Большехетская серия</b>	Мальшевская — песчаники
	Байосс		110		Леонтьевская — аргиллиты
	Верхи аалена		90—120		Вымская — песчаники, алевроиты
	Верхи тоара-аален		20—120		Лайдинская — аргиллиты, песчаники
	Плинсбах-тоар		278—350		Джангодская — песчаники и аргиллиты
	Плинсбах-низы		100—150		Левинская — аргиллиты
Геттанг-синемюр		0—200	Зимняя — песчаники и аргиллиты		
<b>ТРИАС</b>		0—115	Мергели, карбонатно-глинистые, глинисто-кремнистые породы, долерито-базальты		
<b>РСm - PZ3</b>		Более 300	Слабо метаморфизированные сланцы, песчаники; мраморизованные известняки, габбро-диабазы		

Рис. 2. Литолого-стратиграфический разрез Западно-Ямальского шельфа Карского моря  
Fig. 2. Lithological and stratigraphic section of the West Yamal shelf of the Kara Sea

Шарапов Шар сложена льдистыми породами и подвержена интенсивному термообразному разрушению за счет теплового и волнового воздействия, при этом возможность размещения кустовых площадок в прибрежной зоне ограничена, что осложняет разработку шельфовой части месторождения наклонно-направленными скважинами, пробуренными с берега.

Для круглогодичного ведения работ, как показали наши исследования и мировой опыт, предпочтительнее применять ледостойкие грунтовые искусственные острова. Их устойчивость и прочность зависят от инженерно-геологических условий верхней части разреза и несущей способности пород. Характеристики последних определяют при проведении комплексных инженерных изысканий.

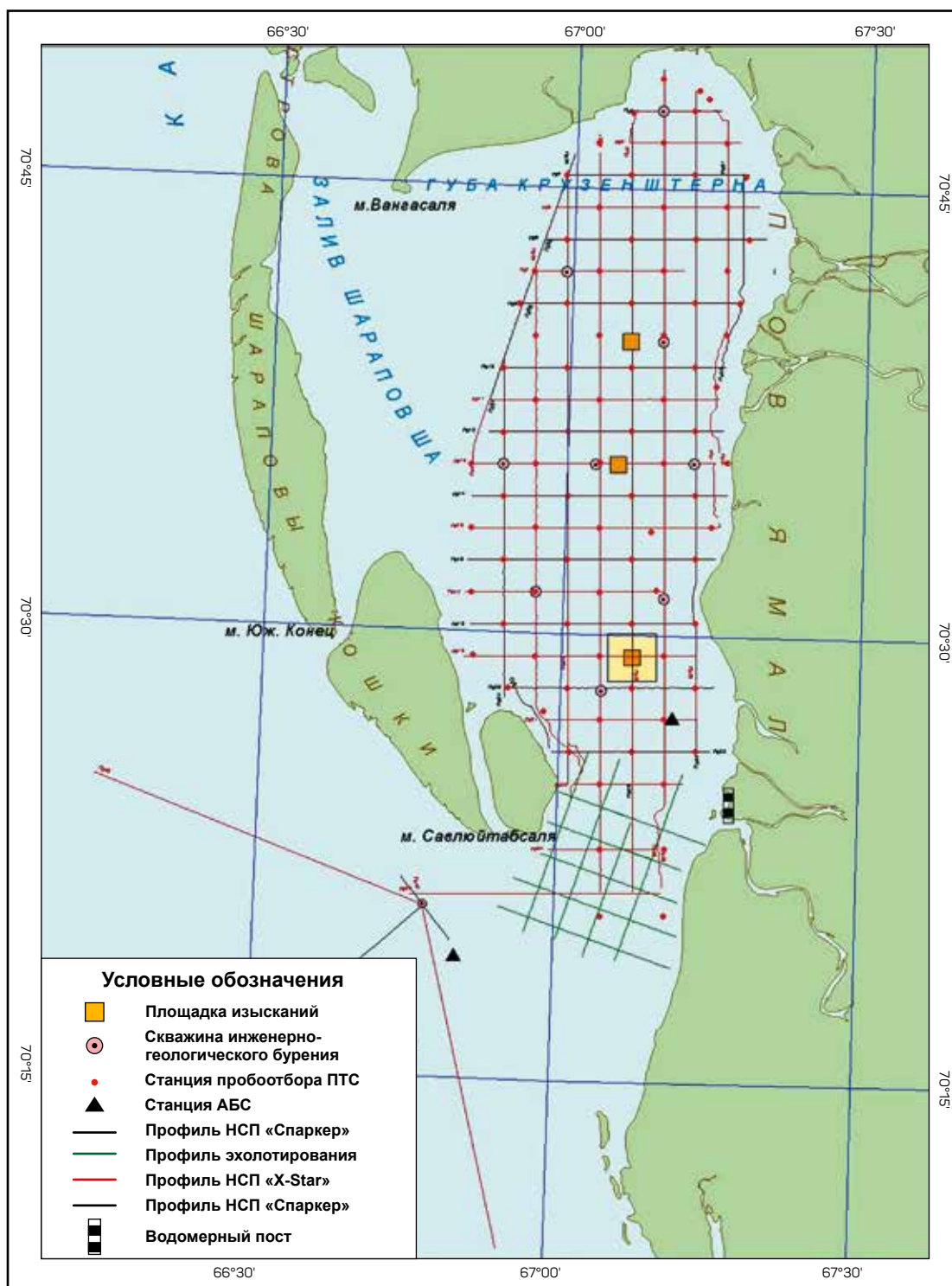


Рис. 3. Схема инженерно-геологической изученности Крузенштернского участка [4]  
 Fig. 3. Scheme of engineering and geological knowledge of the Kruzenshtern site [4]

### Методы исследований

В границах акваториального продолжения площади Крузенштернского месторождения компания ОАО «АМИГЭ» произвела комплексные инженерно-геологические изыскания (рис. 3). Работы включали региональные изыскания в заливе Шарапов Шар

Карского моря и исследования на площадках размером в плане 3×3 км под бурение поисково-разведочных скважин. В центре площадок выделены участки детализации размером 1×1 км [4].

В рамках региональных работ были выполнены:

- инженерно-геологическое бурение — 9 скважин;

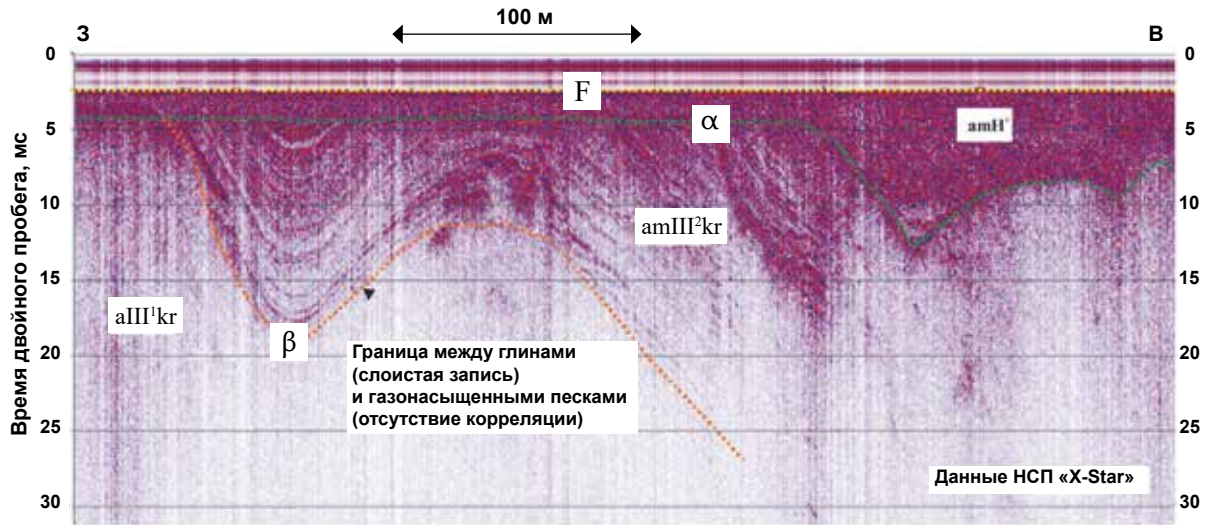


Рис. 4. Сейсмоакустические комплексы на временном разрезе через площадку 1. Обозначения:  $\alpha$  – граница кровли газонасыщенного интервала; граница  $\beta$  коррелируется с подошвой глинистых грунтов  
 Fig. 4. Seismic-acoustic complexes in a temporary section through the site 1. Designations:  $\alpha$  – boundary of the the gas-saturated interval roof; the border  $\beta$  correlates with the clay soil bottom

- сейсмоакустическое профилирование;
- эхолотирование;
- электроразведка в различных модификациях;
- отбор ковшовых проб донных грунтов.

Для полевых работ использовались два судна (специализированное судно ОАО «АМИГЭ») НИС «Керн», перевозившее персонал, оборудование и технику, и арендованный мелкоосидающий теплоход «Мэри-2», буровой понтон и катера с малой осадкой.

На площадках изысканий бурение и отбор керна выполнялись со специализированной самоходной буровой установки «Compact-Sonic». Промерные, геофизические и гидрометеорологические работы, включающие эхолотирование, сейсмоакустическое профилирование, постановку и подъем буйковых станций, отбор поверхностных проб, выполнялись с маломерных катеров АК-690.

Комплекс геофизических работ включал непрерывное сейсмоакустическое профилирование (НСП) в низкочастотном (профилограф «Спаркер») и высокочастотном (профилограф «X-Star») вариантах. Сеть профилей для НСП «Спаркер» и «X-Star» составила 100×100 м.

На катере АК-690, выполнявшем геофизические работы и эхолотирование, был установлен следующий навигационный комплект:

- приемник «TRIMBLE 5700»;
- гирокомпас «PGM-C-009»;
- однолучевой эхолот «HydroBox»;
- программное обеспечение HYDRACK MAX, установленное на ПК.

Плановая привязка на акватории губы выполнялась с использованием глобальной спутниковой навигационной системы GPS с помощью спутниковых приемников TRIMBLE 5700.

### Результаты исследований

#### Сейсмоакустическое профилирование

Сейсмоакустическое профилирование строения осадочного разреза на глубину до 200 м позволило получить временные разрезы, которые показали практически повсеместное наличие свободного газа в осадках верхней части разреза (рис. 4).

Газонасыщенность осадков верхней части разреза парагенетически связана с процессами деградации реликтовой мерзлой толщи. Выделяющийся при таянии мерзлых пород газ перераспределяется в осадочном разрезе в зависимости от проницаемости и коллекторских свойств отложений. В верхней части осадочной толщи пески играют роль коллекторов, а вышележащие глины выступают как покрышки. В песках газонасыщение носит сплошной характер [5].

В вышележащих глинистых отложениях газонасыщение имеет спорадический характер. На отдельных участках, где свободный газ в осадках практически отсутствует, имеют место «акустические окна», в которых слоистая структура глинистых толщ прослеживается на большую глубину.

Ниже границы  $\beta$  залегает толща «акустически прозрачных» песчаных отложений. Отсутствие акустической информации в песчаной толще связано с газонасыщением осадков. По данным сейсмоакустики кровля многолетнемерзлых пород находится на глубинах от 50 до 200 м от поверхности дна.

#### Геокриологические условия

Характерная картина, наблюдаемая на временных разрезах сейсмоакустического профилирования, показывает, что район Крузенштернского участка расположен в границах зоны деградирующей субаквальной криолитозоны. Географи-



Рис. 5. Посткриогенные оскольчато-комковатые структуры в керне. Детальная площадка 1, скважина 3, интервал 13,0–13,2 м [4]

Fig. 5. Post cryogenic comminuted-lumpy structures in the core. Detailed site 1, well 3, interval 13,0–13,2 m [4]

чески эта зона охватывает мелководную область шельфа Карского моря, примыкающую к западному побережью Ямала (западноуральское мелководье) [6; 7].

Субаквальная криолитозона западноуральского мелководья сформировалась в течение последней сартанский регрессии, когда современная акватория осушалась и грунтовая толща подвергалась воздействию низких температур в условиях сурового арктического климата. Затем в ходе трансгрессии современного морского бассейна сформированная при регрессии многолетнемерзлая толща была в значительной степени растеплена. Признаки деградации мерзлоты в виде посткриогенных структур наблюдаются в кернах всех скважин, пробуренных на площадках и площади Круженштернского участка (рис. 5). После того как уровень моря стабилизировался, таяние замедлилось, хотя и продолжается в настоящее время. В пределах западноуральской криолитозоны распространение многолетнемерзлых пород носит островной характер.

Проведенное инженерно-геологическое бурение показало, что в границах 1×1 км детальных площадок 1 и 2 в интервале от поверхности дна до глубины 40 м многолетнемерзлые льдистые грунты отсутствуют.

*Приповерхностные интервалы аномально высоких пластовых давлений (АВПД)*

Приповерхностные интервалы с наличием АВПД нередко вскрывались при инженерно-геологическом бурении на полуострове Ямал, что сопровождалось выбросами газо-водяной смеси и открытым фонтанированием скважин в районах ряда ме-

сторождений, а также на трассе перехода трубопровода через Байдарацкую губу и при изысканиях в Обской и Тазовской губах. Наличие интервалов АВПД в верхней части осадочного разреза связано с многолетнемерзлыми породами.

На площадях Харасавэйского и Бованенковского месторождений на полуострове Ямал при бурении поисково-разведочных скважин на нефть и газ в верхней части осадочного разреза (на глубинах менее 200 м) неоднократно отмечались интервалы аномально высокого пластового давления [8].

При инженерно-геологическом бурении на детальных площадках 1 и 2 Круженштернского участка выбросы и газопроявления в диапазоне глубин от поверхности дна до 40 м не наблюдались. Однако исключать возможность подобных явлений на больших глубинах не следует [9].

*Рельеф дна*

Глубина моря на большей части площади Круженштернского месторождения составляет менее 3 м. Лишь в крайней южной части площади глубины моря превышают 3 м. Рельеф дна в пределах площади месторождения в основном ровный пологий, однако напротив устьев впадающих рек наблюдаются впадины (промоины), где глубины моря могут увеличиваться до 10 м и более.

На площади изысканий в тестовом режиме было выполнено несколько коротких профилей методом гидролокации бокового обзора (ГЛБО) в центральной части площадки 2. Полученные данные выявили на дне многочисленные линейные формы, которые относятся к так называемым бороздам ледового выпаживания. Обычно в арктических условиях на столь малых глубинах такие борозды практически не выявлялись. Считалось, что в закрытых мелководных заливах ледовый покров малоподвижен, так как может смерзаться с дном и часто растаивает на месте. Тем не менее в центре площадки выявлены широкие (до 40 м) и узкие (3–5 м) борозды протяженностью более 200 м. Направление борозд преимущественно субмеридиональное (рис. 6).

По данным магнитометрии вся площадь изысканий характеризуется относительно умеренным магнитным полем, представленным низкоамплитудны-

ми аномалиями, хаотически расположенными в области исследований, и небольшим увеличением их интенсивности на отдельных участках, скорее всего связанным с магнитными свойствами верхних слоев осадков.

### Характеристика верхней части разреза грунтов

В составе четвертичной толщи Крузенштернского участка исследования выделяются следующие стратиграфические подразделения (табл. 1):

- нижнее-среднеплейстоценовая ямальская серия (mI-lIym);
- верхнеплейстоценовая казанцевская свита (mIII<sup>1</sup>kz);
- верхнеплейстоценовый зырянский надгоризонт (a-amIII2-3zr), объединяющий ермаковский аллювиальный (aIII<sup>2</sup>er) и каргинский аллювиально-морской (amIII<sup>3</sup>kr) горизонты;
- верхнеплейстоценовый сартанский горизонт (аллювиальные отложения) (aIII<sup>4</sup>sr);
- нижнеголоценовые аллювиально морские осадки (amH<sup>1</sup>);
- верхнеголоценовые морские осадки (mH<sup>2</sup>);
- современные морские осадки (mH<sup>3</sup>).

По данным лабораторных исследований керна свойства грунтов характеризуются следующими физико-механическими особенностями. В разрезе площадки 1 выделено десять инженерно-геологических элементов (ИГЭ). В верхней части разреза донных отложений выделено два ИГЭ (пачка слабых глинистых грунтов), близких по генезису, составу и физико-механическим свойствам. Отложения данного комплекса имеют повсеместное распространение, суммарная мощность отложений по данным бурения и НСП колеблется от 2,2 до 10,5 м.

**Инженерно-геологический элемент 1** залегает с поверхности дна, распространен повсеместно в пределах площадки, минимальная вскрытая мощность — 2,0 м (скважина 5), максимальная — 6,3 м (скважина 6).

Ил характеризуется средним содержанием частиц: глинистых — 42,0%, пылеватых — 42,3%, песчаных — 15,7%. По числу пластичности ( $I_p = 0,21$ ) ил характеризуется как глинистый.

Нормативные значения природной влажности и плотности влажного грунта соответственно равны 0,47 и 1,74 г/см<sup>3</sup>, коэффициента пористости — 1,288. Среднее содержание органического вещества составляет 0,045.

По данным сдвиговых испытаний нормативное значение удельного сцепления равно 9 кПа, угол внутреннего трения — 5,7°. Компрессионный модуль деформации равен 0,4 МПа. Нормативное значение сцепления по трехосным испытаниям по схеме НН составило 14 кПа.

Недренированное сцепление составило по микропенетromетру 11 кПа, по микрокрыльчатке — 15 кПа, по лабораторной крыльчатке — 18 кПа.

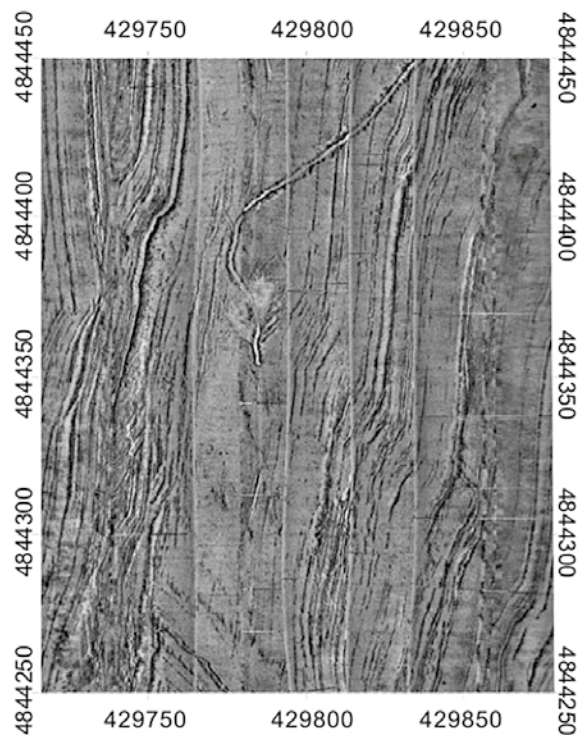


Рис. 6. Борозды ледового выпаживания по данным ГЛБО. Центральная часть площадки 2  
Fig. 6. Slickensiding of ice plowing according to GLBO. The central part of the site 2

**Инженерно-геологический элемент 2** залегает вторым от поверхности дна, распространен практически повсеместно в пределах площадки, минимальная вскрытая мощность составила 2,5 м (скважина 5), максимальная — 7,0 м (скважина 4).

Суглинок текучепластичный характеризуется следующим средним содержанием частиц: глинистых — 31,4%, пылеватых — 40,9%, песчаных — 27,7%, что характеризует суглинок как пылеватый.

По числу пластичности ( $I_p = 0,15$ ) суглинок классифицируется как тяжелый. Нормативное значение природной влажности и плотности влажного грунта соответственно равны 0,31 и 1,92 г/см<sup>3</sup>, коэффициента пористости — 0,830. Среднее содержание органического вещества составляет 0,036.

По данным сдвиговых испытаний нормативное значение удельного сцепления равно 9 кПа, угол внутреннего трения — 10,1°.

Недренированное сцепление составило по микропенетromетру 21 кПа, по микрокрыльчатке — 27 кПа, по лабораторной крыльчатке — 25 кПа.

В качестве относительно надежных могут рассматриваться грунты инженерно-геологического элемента 3 (3а), 4, 5, 6 (6а) и 7 (7а) (рис. 7).

**Инженерно-геологический элемент 3** распространен преимущественно в центре и северной части площадки. Вскрытая мощность составляет от 0,4 до 4,8 м.

Таблица 1. Схема сейсмостратиграфического расчленения грунтовой толщи

Система	Отдел	Звено	Надгоризонт	Горизонт	Индекс	Отражающая граница	Характер отражающей границы	Литология, условия осадконакопления	№ ИГЭ
Четвертичная	Голоцен	Современное		Современный	mH <sup>3</sup>	F	Морское дно, угловое несогласие	Тонкий глинисто-суглинистый наилок или песчаный налет мощностью менее 20 см	—
				Верхний	mH <sup>2</sup>	α2	Согласная	Глины и суглинки текучей консистенции неслоистые землистой структуры с примазками и гнездами, насыщенными гидротроилитом, с присыпками и линзами песка	—
				Нижний	amH <sup>1</sup>	α1		Глины и суглинки текучей-текучепластичной консистенции тонкослоистые, реже илы с прослоями, насыщенными гидротроилитом, с присыпками, линзами и прослоями песка	1, 2
	Неоплейстоцен	Верхнее	Зырянский	Сартанский	all <sup>4</sup> sr	α2	Эрозионное несогласие	Перерыв, аллювиальные, озерно-аллювиальные пески с прослоями и линзами торфа, реже супеси	—
				Каргинский	amIII <sup>3</sup> kr	α	Эрозионное несогласие с элементами углового	Суглинки и глины темно-серые до черных с характерной слоистой текстурой, с линзами, прослоями и гнездами, насыщенными гидротроилитом, с прослоями и присыпками песка и редкими включениями гравия и щебня. В кровле переуплотнены. Система эстуариев, аллювиально-морские условия	3, 3а, 4, 5
				Ермаковский	all <sup>2</sup> er	β	Не установлен	Пески серые пылеватые водонасыщенные с мощными (до 10 м и более) пропластками супесей. Пески и супеси содержат прослойки и линзы, насыщенные гидротроилитом, прослойки торфа, редкий гравий и щебень. Речная долина, аллювиальные	6, 6а
				Казанцевский	m,gmIII <sup>1</sup> kz		Не установлен	Суглинки и глины тонкослоистые. Толща характеризуется чередованием через 1—3 м интервалов относительно грубого суглинистого и более тонкого глинистого состава. Кровля залегает на глубинах от 6 до 40 м и более. Морской бассейн	7, 7а



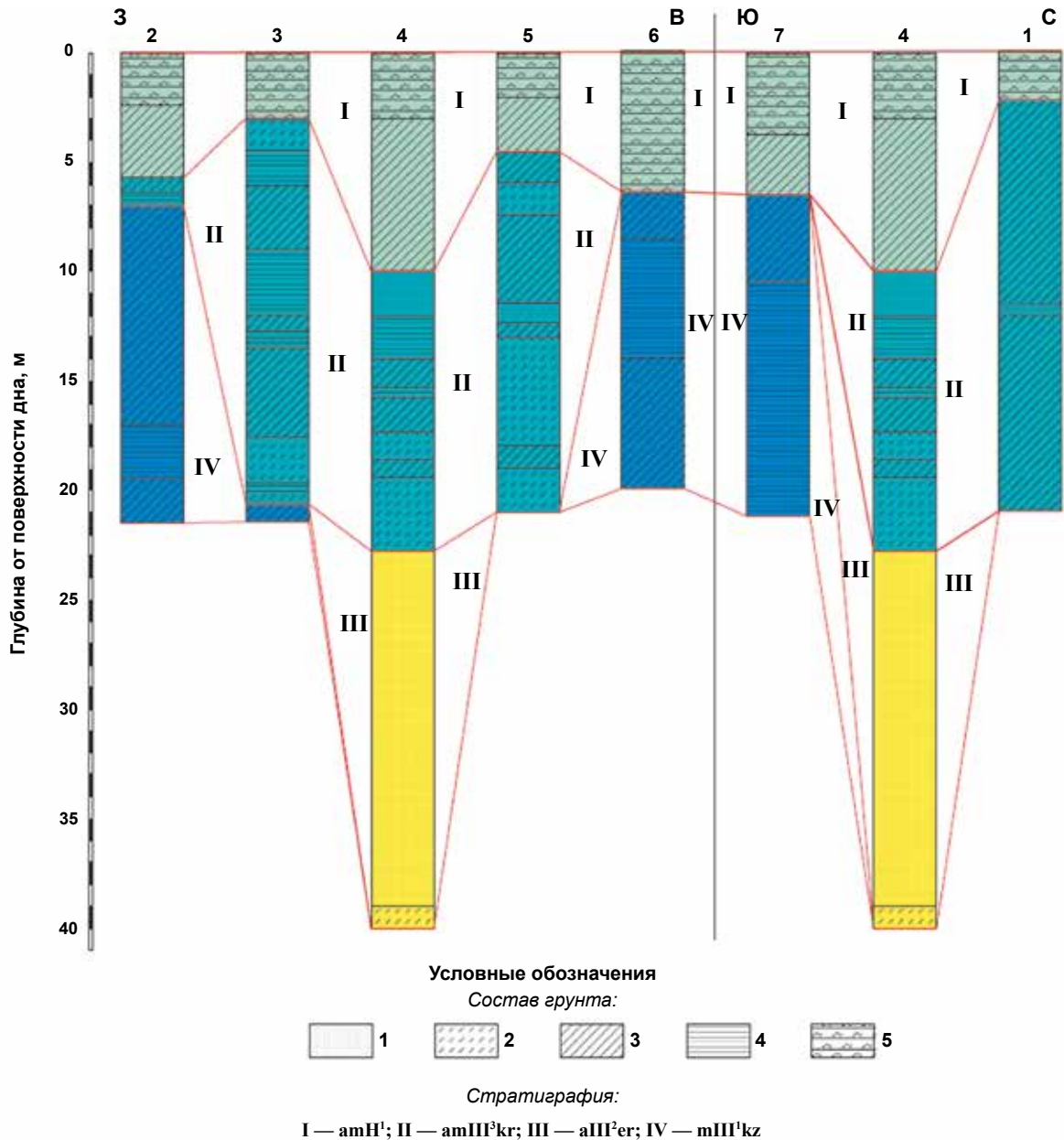


Рис. 7. Корреляция инженерно-геологических скважин на площадке 1 (72). Обозначения: 1 – пески, 2 – супеси, 3 – суглинки, 4 – глины, 5 – глинистые илы  
 Fig. 7. Correlation of engineering and geological wells at site 1 (72). Designations: 1 – sand, 2 – sandy loam, 3 – loam, 4 – clay, 5 – clay silt

Супесь текучая характеризуется средним содержанием частиц: глинистых — 13,0%, пылеватых — 27,7%, песчаных — 59,3%, что характеризует супесь как пылеватую.

Нормативное значение природной влажности в среднем составляет 0,28 при плотности 1,94 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,757.

Нормативное значение сцепления по трехосным испытаниям по схеме НН составило 11 кПа.

Модуль деформации в интервале нагрузок 0,0—0,50 МПа — 10,0 МПа. Удельное сце-

пление и угол внутреннего трения составили 11,0 кПа и 21°. Недренированное сцепление составило по микропенетromетру 30 кПа, по микрокрыльчатке — 34 кПа.

**Инженерно-геологический элемент 3а** распространен в центре площадки.

Среднее содержание частиц в гранулометрическом составе: глинистых — 3,9%, пылеватых — 11,0%, песчаных — 85,1%. По степени неоднородности  $C_u = 7,1$  песок пылеватый характеризуется как неоднородный.

Нормативное значение природной влажности составляет 0,25 при плотности 1,92 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,734.

Ввиду малой мощности слоя прочностные и деформационные свойства песка не исследовались. Модуль деформации в приборе трехосного сжатия в интервале нагрузок 0,0—0,50 МПа — 51,2 МПа. Удельное сцепление и угол внутреннего трения составили 0 кПа и 34,2°.

**Инженерно-геологический элемент 4** распространен локально.

Суглинок мягкопластичный характеризуется средним содержанием частиц: глинистых — 21,1%, пылеватых — 51,0%, песчаных — 27,9%, что характеризует суглинок как пылеватый.

По числу пластичности ( $I_p = 0,11$ ) суглинок классифицируется как легкий.

Нормативное значение природной влажности в среднем 0,31 при плотности 1,91 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,829.

По данным сдвиговых испытаний нормативное значение удельного сцепления равно 12 кПа, угол внутреннего трения — 17,1°. Нормативное значение сцепления по трехосным испытаниям по схеме НН составило 55 кПа. Недренированное сцепление по микропенетрометру — 18 кПа, по микрокрыльчатке — 23 кПа, по лабораторной крыльчатке — 21 кПа.

**Инженерно-геологический элемент 5** распространен локально.

В гранулометрическом составе преобладает среднее содержание пылеватых частиц 27,6%, содержание глинистых частиц — 61,7%, песчаных частиц — 10,7%, что характеризует глину как пылеватую.

По числу пластичности ( $I_p = 0,25$ ) глина классифицируется как легкая. Нормативное значение природной влажности в среднем 0,38, при плотности 1,82 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 1,015. Среднее содержание органического вещества составляет 0,056.

Нормативные значения деформационных свойств глины тугопластичной по результатам трехосного сжатия по схеме консолидированно-недренированного сдвига: модуль деформации в приборе трехосного сжатия в интервале нагрузок 0,0—0,05 МПа — 13,5 МПа, коэффициент консолидации — 0,30  $C_v$  м<sup>2</sup>/год. Удельное сцепление и угол внутреннего трения составили 29 кПа и 13,5°. Недренированное сцепление составило: по микропенетрометру — 67 кПа, по микрокрыльчатке — 69 кПа, по лабораторной крыльчатке — 75 кПа.

**Инженерно-геологический элемент 6** распространен в центре площадки с глубины 22,8 м, вскрытая мощность составила 15,3 м.

Среднее содержание частиц в гранулометрическом составе: глинистых — 3,1%, пылеватых — 7,2%, песчаных — 89,7%. По степени неоднородности  $C_u = 3,3$  песок пылеватый характеризуется как неоднородный.

Нормативное значение природной влажности составляет 0,24 при плотности 1,93 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,712.

Нормативные значения прочностных и деформационных свойств песка пылеватого охарактеризованы по результатам сдвиговых испытаний и в приборах трехосного сжатия по схеме консолидированно-дренированного сдвига. Модуль деформации в приборе трехосного сжатия в интервале нагрузок 0,0—0,05 МПа — 57,4 МПа. Удельное сцепление и угол внутреннего трения составили 0 кПа и 39,8°.

**Инженерно-геологический элемент 6а** распространен локально.

Супесь пластичная характеризуется средним содержанием частиц: глинистых — 14,3%, пылеватых — 34,8%, песчаных — 50,9%, что характеризует супесь как пылеватую.

Нормативное значение природной влажности в среднем 0,26 при плотности 1,82 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,854.

Нормативные значения прочностных и деформационных свойств песка пылеватого охарактеризованы по результатам сдвиговых испытаний и в приборах трехосного сжатия по схеме консолидированно-недренированного сдвига. Модуль деформации в приборе трехосного сжатия в интервале нагрузок 0,0—0,5 МПа — 7 МПа. Удельное сцепление и угол внутреннего трения составили 9 кПа и 18°.

**Инженерно-геологический элемент 7** распространен преимущественно на крайних участках площадки.

Суглинок мягкопластичный характеризуется средним содержанием частиц: глинистых — 35,9%, пылеватых — 39,4%, песчаных — 24,7%, что характеризует суглинок как пылеватый.

По числу пластичности ( $I_p = 0,14$ ) суглинок классифицируется как тяжелый.

Нормативное значение природной влажности в среднем 0,26 при плотности 2,00 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,692.

По данным сдвиговых испытаний нормативное значение удельного сцепления равно 13,7 кПа, угол внутреннего трения — 18°. Нормативное значение сцепления по трехосным испытаниям по схеме НН составило 102 кПа. Компрессионный модуль деформации составил 2,6 МПа. Недренированное сцепление по микропенетрометру — 58 кПа, по микрокрыльчатке — 61 кПа, по лабораторной крыльчатке — 65 кПа.

**Инженерно-геологический элемент 7а** распространен локально, преимущественно на крайних участках площадки. Максимальная вскрытая мощность составила 14,6 м (скважина 7).

В гранулометрическом составе преобладает среднее содержание пылеватых частиц — 40,7%, содержание глинистых частиц — 47,5%, песчаных — 11,8%, что характеризует глину как пылеватую.

По числу пластичности ( $I_p = 0,18$ ) глина классифицируется как легкая. Нормативное значение природной

влажности в среднем 0,32 при плотности 1,91 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,869. Среднее содержание органического вещества составляет 0,046.

По данным сдвиговых испытаний нормативные значения удельного сцепления равно 13 кПа, угол внутреннего трения — 28,2°.

Нормативные значения деформационных свойств глины мягкопластичной по результатам трехосного сжатия по схеме консолидированно-недренированного сдвига: модуль деформации в приборе трехосного сжатия в интервале нагрузок 0,0—0,05 МПа — 15,0 МПа, коэффициент консолидации — 0,40  $C_v$  м<sup>2</sup>/год. Удельное сцепление и угол внутреннего трения составили 40 кПа и 12,6°. Компрессионный модуль деформации — 1,9 МПа.

Недренированное сцепление составило по микропенетрометру 64 кПа, по микрокрыльчатке — 72 кПа, по лабораторной крыльчатке — 79 кПа.

На глубине более 40 м от поверхности дна ИГЭ-7 и ИГЭ-7а могут находиться в мерзлом состоянии.

В разрезе детальной площадки 2 выделено пять инженерно-геологических элементов. В верхней части разреза донных отложений выделены два наиболее слабых ИГЭ (пачка слабых глинистых грунтов), близких по составу и физико-механическим свойствам. Отложения данного комплекса распространены повсеместно в пределах площадки и имеют довольно выдержанную мощность, по данным бурения от 5,8 до 7,1 м.

**Инженерно-геологический элемент 1** залегает с поверхности дна, распространен повсеместно в пределах площадки, минимальная вскрытая мощность — 0,2 м, максимальная — 0,5 м.

Ил глинистый характеризуется средним содержанием частиц: глинистых — 44,7%, пылеватых — 44,7%, песчаных — 10,6%. По числу пластичности ( $I_p = 0,24$ ) ил характеризуется как глинистый.

Нормативные значения природной влажности и плотности влажного грунта равны соответственно 0,66 и 1,71 г/см<sup>3</sup>, коэффициента пористости — 1,763. Среднее содержание органического вещества составляет 0,044.

По данным сдвиговых испытаний нормативное значение удельного сцепления равно 8 кПа, угол внутреннего трения — 11,4°. Компрессионный модуль деформации равен 0,4 МПа.

Недренированное сцепление составило по микропенетрометру 6 кПа, по микрокрыльчатке — 8 кПа, по лабораторной крыльчатке — 10 кПа.

**Инженерно-геологический элемент 2** распространен повсеместно в пределах площадки, минимальная вскрытая мощность составила 5,4 м (скважина 5), максимальная — 6,4 м (скважина 6).

Глина текучая характеризуется средним содержанием частиц: глинистых — 43,6%, пылеватых — 43,7%, песчаных — 12,7%, что характеризует глину как пылеватую.

По числу пластичности ( $I_p = 0,22$ ) глина классифицируется как легкая.

Нормативные значения природной влажности и плотности влажного грунта соответственно равны 0,47 и 1,75 г/см<sup>3</sup>, коэффициента пористости — 1,261. Среднее содержание органического вещества составляет 0,046.

По данным сдвиговых испытаний нормативное значение удельного сцепления равно 6 кПа, угол внутреннего трения — 12,3°. Компрессионный модуль деформации равен 0,5 МПа. Нормативное значение сцепления по трехосным испытаниям по схеме НН составило 15 кПа.

Нормативные значения деформационных свойств суглинка текучего по результатам трехосного сжатия по схеме консолидированно-недренированного сдвига: коэффициент консолидации — 0,10  $C_v$  м<sup>2</sup>/год, удельное сцепление — 4 кПа, угол внутреннего трения — 18,4°. Модуль деформации в приборе трехосного сжатия в интервале нагрузок 0,0—0,05 МПа равен 3,5 МПа.

Недренированное сцепление составило по микропенетрометру 8 кПа, по микрокрыльчатке — 18 кПа, по лабораторной крыльчатке — 15 кПа.

В качестве надежного основания может рассматриваться грунт инженерно-геологического элемента 5, который представлен песком пылеватым водонасыщенным средней плотности сложения, с тонкими слоями и гнездами гидротроилита, с гнездами и редкими прослойками плохо разложившегося торфа, с рассеянным раковинным детритом, с окатышами и линзами суглинка, с растительными остатками.

**Инженерно-геологический элемент 5** распространен повсеместно в пределах площадки, залегает под слабыми глинистыми грунтами. Максимальная вскрытая мощность составляет 31,5 м.

Среднее содержание частиц в гранулометрическом составе: глинистых — 2,8%, пылеватых — 7,3%, песчаных — 89,9%. По степени неоднородности  $C_u = 4,8$  песок пылеватый характеризуется как неоднородный.

Нормативное значение природной влажности составляет 0,24 при плотности 1,97 г/см<sup>3</sup> и коэффициенте пористости 0,770. Среднее содержание органического вещества — 0,005.

Нормативные значения прочностных и деформационных свойств песка пылеватого охарактеризованы по результатам сдвиговых испытаний и в приборах трехосного сжатия по схеме консолидированно-дренированного сдвига. Модуль деформации в приборе трехосного сжатия в интервале нагрузок 0,0—0,05 МПа — 45,5 МПа. Удельное сцепление и угол внутреннего трения составили 0 кПа и 38,2°. Компрессионный модуль деформации равен 39,8 МПа.

Результаты полевых исследований позволили охарактеризовать инженерно-геологические условия площади Крузенштернского месторождения. Было установлено, что в строении отложений выделено 10 грунтовых разновидностей. Залегание слоев линзовидное, мощность резко изменяется, наблюдается значительное изменение показателей свойств

грунтов в плане и по глубине. Верхняя часть осадочного разреза представлена четвертичными отложениями. По данным инженерно-геологических изысканий и геолого-съёмочных работ мощность четвертичных отложений на западном побережье Ямала превышает 100 м.

В составе четвертичных отложений преобладают глинистые образования (глины и суглинки). Их доля в объеме всей четвертичной толщи составляет 80—90%. Пески имеют подчиненное значение. Глинистые отложения имеют гидрослюдисто-монтмориллонитовый состав (с примесью каолинита и хлорита). Пески характеризуются кварц-полевошпатовым составом.

### Заключение

Полученные данные о рельефе дна, глубине моря, характеристике инженерно-геологических, гидрометеорологических и ледовых условий на детальных площадках необходимы при выборе способов и технических средств для проведения разведочного бурения, а также позволят произвести необходимые расчеты для постановки буровой установки на площадку.

В результате анализа данных инженерно-геологических изысканий в заливе Шарапов Шар Карского моря в границах акваториального продолжения площади Крузенштернского месторождения установлено:

1. В строении верхних 30 м отложений принимают участие более трех слоев, залегание слоев линзовидное, мощность резко изменяется. Наблюдается значительное изменение показателей свойств грунтов в плане и по глубине.

2. Рельеф дна на площадках исследования 1 и 2 ровный. В составе изученного разреза развиты четвертичные отложения. В разрезе площадки 1 выделено 10 инженерно-геологических элементов. Грунты элементов 1 и 2 представлены пачкой слабых глинистых грунтов, близких по генезису, составу и физико-механическим свойствам. Отложения данного комплекса повсеместно распространены, суммарная мощность отложений по данным бурения и НСП колеблется от 2,2 до 10,5 м.

В качестве относительно прочных могут рассматриваться грунты инженерно-геологических элементов 3 (3а), 4, 5, 6 (6а) и 7 (7а), обладающие достаточным недренированным сцеплением (34—72 кПа), малым коэффициентом консолидации ( $0,30 C_v \text{ м}^2/\text{год}$ ) и высоким нормативным значением сцепления по трехосным испытаниям по схеме НН (55—102 кПа).

В разрезе площадки 2 выделено пять инженерно-геологических элементов. Грунты элементов 1 и 2 также слабые (пачка слабых глинистых грунтов). Отложения данного комплекса распространены повсеместно в пределах площадки и имеют довольно выдержанную мощность, по данным бурения — от 5,8 до 7,1 м.

В качестве достаточно надежного основания для морских сооружений может рассматриваться грунт инженерно-геологического элемента 5, обладающий высоким компрессионным модулем деформации, равным 39,8 МПа.

3. Многолетнемерзлые породы центральной части площадок до глубины 40 м бурением не обнаружены, однако по данным сейсмоакустического профилирования кровля многолетнемерзлых пород (ММП) в разрезе отмечается на глубинах от 50 до 200 м от поверхности дна. Присутствие в разрезе ММП может создавать условия для концентрации газа с образованием интервалов аномально высокого пластового давления. При этом наиболее опасными с этой точки зрения являются интервалы, приуроченные к подошве ММП.

4. Инженерные изыскания, выполненные на акватории залива Шарапов Шар, показали сложное и неоднородное строение инженерно-геологических элементов. На детальной площадке 1 выделено 10 ИГЭ, а на исследуемой площадке 2 — только 5. Надежные опорные пласты в изученной акватории по площади залегают на разных глубинах, характеризуются различными свойствами. Некоторые ИГЭ распространены повсеместно с определенной мощностью залегания, некоторые распределены лишь локально.

Выполненных в весьма ограниченных объемах инженерно-геологических изысканий недостаточно для проектирования объектов обустройства и предстоящего освоения морской части Крузенштернского месторождения. Для принятия решения о концепции его разработки в акватории (строительство искусственного островного сооружения, прокладка трубопроводов) требуются не только дополнительные инженерно-геологические, но также гидрометеорологические и экологические исследования.

### Литература

1. Никитин Б. А., Дзюбло А. Д., Шустер В. Л. Геолого-геофизическая оценка перспектив нефтегазоносности глубоководных горизонтов полуострова Ямал и Приямальского шельфа Карского моря // Нефтяное хоз-во. — 2014. — № 11. — С. 102—106.
2. Научно-технический отчет «Разработка технических решений по освоению месторождений углеводородов на предельно мелководном арктическом шельфе РФ (на примере Приямальского шельфа Карского моря)» по договору с ПАО «Газпром» / РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина. — М., 2013.
3. Дзюбло А. Д., Алексеева К. В. Технологии и особенности освоения месторождений углеводородов в мелководных транзитных зонах Приямальского шельфа Карского моря // Тр. РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. — 2019. — № 1/294. — С. 17—29.
4. Рокос С. И., Куликов С. Н., Коротков С. В. и др. Технический отчет по объекту «Инженерные изыскания в пределах Крузенштернского участка» / ОАО «АМИГЭ». — Мурманск, 2011. — 181 с.

5. Якушев В. С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М.: ВНИИГАЗ, 2009. — 192 с.
6. Баду Ю. Б. Газоносные структуры и криогенная толща криолитологических провинций Ямала // Инженер. геология. — 2017. — № 1. — С. 39—52.
7. Бондарев В. Н., Длугач А. Г., Костин А. Д. и др. Акустические фации посткриогенных обстановок мелководных районов Печорского и Карского морей // Разведка и охрана недр. — 1999. — № 7—8. — С. 10—14.
8. Рокос С. И. Инженерно-геологические особенности приповерхностных зон аномально высокого пластового давления на шельфе Печорского и южной части Карского морей // Инженер. геология. — 2008. — № 4. — С. 22—28.
9. Богоявленский В. И., Сизов О. С., Богоявленский И. В., Никонов Р. А. Дистанционное выявление участков поверхностных газопроявлений и газовых выбросов в Арктике: полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 3 (23). — с 4—15.

---

### Информация об авторах

**Дзюбло Александр Дмитриевич**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем нефти и газа РАН (119333, Россия, Москва, ул. Губкина, д. 3), профессор кафедры «Освоение морских нефтегазовых месторождений», Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: dzyublo.a@gubkin.ru.

**Алексеева Ксения Владимировна**, аспирант кафедры «Освоение морских нефтегазовых месторождений», Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 65), e-mail: kseniya-alekseeva-95@mail.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Дзюбло А. Д., Алексеева К. В. Инженерно-геологические условия обустройства акваториальной части Круzenshternского месторождения в Карском море // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 95—108. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-95-108.

---

## ENGINEERING AND GEOLOGICAL CONDITIONS FOR THE DEVELOPMENT OF THE WATER PART OF THE KRUZENSHTERN DEPOSIT IN THE KARA SEA

Dzyublo A. D.

Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Alekseeva K. V.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

The article was received on October 31, 2019

### Abstract

The authors consider engineering surveys necessary to obtain data on the bottom topography, sea depth, characteristics of engineering-geological, hydrometeorological and ice conditions, which later will help to choose methods and technical means for exploration drilling, and will allow making the necessary calculations for setting the drilling rig at detailed site. As a result of engineering surveys at the Kruzenshtern deposit, dangerous physical and geological phenomena are identified: the presence of frozen rocks in the section at depths from 50 to 200 meters; the possible presence of abnormally high reservoir pressure (AHRP) intervals, while the most dangerous, from this point of view, are the intervals associated with the base of the permafrost rocks (PR).

**Keywords.** *Kruzenshtern deposit, shallow water shelf, engineering and geological surveys, geocryological conditions, near-surface intervals of abnormally high reservoir pressure (AHRP), gas resources.*

### References

1. Nikitin B. A., Dzyublo A. D., Shuster V. L. Geologo-geofizicheskaya otsenka perspektiv neftegazonosnosti glubokozalegayushchikh gorizontov poluostrava Yamal i Priyamal'skogo shel'fa Karskogo morya. [Geological and geophysical assessment of the prospects for oil and gas presence in the deep-lying horizons of the Yamal Peninsula and the Priyamalsky shelf of the Kara Sea]. Neftyanoe khoz-vo, 2014, no. 11, pp. 102—106. (In Russian).
2. Nauchno-tehnicheskiiy otchet "Razrabotka tekhnicheskikh resheniy po osvoeniyu mestorozhdeniy uglevodorodov na predel'no melkovodnom arkticheskom shel'fe RF (na primere Priyamal'skogo shel'fa Karskogo morya)" po dogovoru s PAO "Gazprom". [Scientific and technical report "Development of technical solutions for the development of hydrocarbon deposits on the extremely shallow Arctic shelf of the Russian Federation (using the Priyamalsky shelf of the Kara Sea as an example)" under an agreement with Gazprom]. RGU nefti i gaza (NIU) imeni I. M. Gubkina. Moscow, 2013. (In Russian).
3. Dzyublo A. D., Alekseeva K. V. Tekhnologii i osobennosti osvoeniya mestorozhdeniy uglevodorodov v melkovodnykh tranzitnykh zonakh Priyamal'skogo shel'fa Karskogo morya. [Technologies and features of the development of hydrocarbon deposits in the shallow-water transit zones of the Priyamalsky shelf of the Kara Sea]. Tr. RGU nefti i gaza imeni I. M. Gubkina, 2019, no. 1 (294), pp. 17—29. (In Russian).
4. Rokos S. I., Kulikov S. N., Korotkov S. V. et al. Tekhnicheskiiy otchet po ob"ektu "Inzhenernye izyskaniya v predelakh Kruzenshternskogo uchastka". [Technical report on the object: "Engineering surveys within the Kruzenshternsky site"]. OAO "AMIGE". Murmansk, 2011, 181 p. (In Russian).
5. Yakushev V. S. Prirodnyy gaz i gazovye gidraty v kriolitozone. [Natural gas and gas hydrates in the cryolithozone]. Moscow, VNIIGAZ, 2009, 192 p. (In Russian).
6. Badu Yu. B. Gazonosnye struktury i kriogennaya tolshcha kriolitologicheskikh provintsiy Yamala. [Gas-bearing structures and cryogenic strata of the cryolithological provinces of Yamal]. Inzhener. geologiya, 2017, no. 1, pp. 39—52. (In Russian).
7. Bondarev V. N., Dlugach A. G., Kostin A. D., Lisunov V. K., Rokos S. I. Akusticheskie fatsii postkriogennykh obstanovok melkovodnykh rayonov Pechorskogo i Karskogo morey. [Acoustic facies of post-cryogenic conditions in shallow areas of the Pechersk and Kara Seas]. Razvedka i okhrana neдр, 1999, no. 7—8, pp. 10—14. (In Russian).
8. Rokos S. I. Inzhenerno-geologicheskie osobennosti pripoverkhnostnykh zon anomal'no vysokogo plastovogo davleniya na shel'fe Pechorskogo i yuzhnoy chasti Karskogo morey. [Geotechnical features of the near-surface zones of abnormally high reservoir pressure on the shelf of the Pechora and the southern part of the Kara Sea]. Inzhener. geologiya, 2008, no. 4, pp. 22—28. (In Russian).
9. Bogoyavlensky V. I., Sizov O. S., Bogoyavlensky I. V., Nikonov R. A. Distantionnoe vyavlenie uchastkov poverkhnostnykh gazoprovyavleniy i gazovykh vybrososov v Arktike: poluostrav Yamal. [Remote detection of areas of surface gas manifestations and gas emissions in the Arctic: Yamal Peninsula]. Arktika: ekologiya i ekonomika, 2016, no. 3 (23), pp. 4—15. (In Russian).

### Information about the authors

**Dzyublo Alexander Dmitrievich**, Doctor of Geology and Mineralogy, Leading Researcher, Oil and Gas Research Institute of RAS (3, Gubkina St., Moscow, Russia, 119333), Professor of the Department of development of offshore oil and gas fields, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: dzyublo.a@gubkin.ru.

**Alekseeva Ksenia Vladimirovna**, Postgraduate of the Department of development of offshore oil and gas fields, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Prosp., Moscow, Russia, 119991), e-mail: kseniya-alekseeva-95@mail.ru.

### Bibliographic description

Dzyublo A. D., Alekseeva K. V. Engineering and geological conditions for the development of the water part of the Kruzenshtern deposit in the Kara Sea. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 1 (37), pp. 95—108. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-95-108. (In Russian).

© Dzyublo A. D., Alekseeva K. V., 2020