

Инженерно-геологические условия и новые данные о строении морского дна западной части Карского моря

С.Л. Никифоров¹, Д.Г.Н.
Н.О. Сорохтин¹, Д.Г.-М.Н.
Р.А. Ананьев¹
А.И. Фриденберг²
А.А. Колубакин³
Е.А. Мороз⁴, К.Г.-М.Н.
Е.А. Сухих⁴
Ю.Г. Маринова¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

²ПАО «НК «Роснефть»

³ООО «РН-Эксплорейшн»,
ОГ ПАО «НК «Роснефть»

⁴Геологический институт РАН

Адрес для связи: nikiforov@ocean.ru, nsorokhtin@ocean.ru,
ananyev@ocean.ru, a_fridenberg@rosneft.ru,
a_kolubakin@rn-exp.rosneft.ru, morozzea@gmail.com,
sukhikh_ea@mail.ru, marinova.ocean@gmail.com

Ключевые слова: Карское море, рельеф морского дна, природные риски, флювиальный рельеф, палеогеография

ПАО «НК «Роснефть» продолжает изучение современных геолого-геоморфологических процессов, включая природные риски, с целью определения инженерно-геологических условий в районах освоения шельфа арктических морей и концептуального проектирования. Актуальность проблемы обусловлена масштабом задач и новых вызовов, возникших перед Россией в XXI веке, продолжающей освоение ресурсов Арктики в исключительно сложных и активно меняющихся природно-климатических условиях. Необходимо обращать особое внимание на потенциально опасные процессы и объекты: покмарки (воронки, сформированные на дне выбросами газа); эмиссию газов в водную толщу; газовые скопления, формирующие аномалии сейсмоакустической записи в верхней части осадочной толщи; неотектонические деформации; борозды ледникового выпихивания; интенсивные течения. Важным геоморфологическим элементом морского дна Карского моря являются подводные каньоны, которые характеризуются резкой изменчивостью рельефа и проявлением активных литодинамических процессов, в том числе опасных. Формирование флювиального рельефа в исследуемом регионе ассоциируется как с классическим развитием речных долин, так и с эрозионной деятельностью ледниковых вод. Полученные в рамках работы результаты позволяют определить степень сложности инженерно-геологических условий и оценить риски, которые могут возникнуть при реализации проектов разведки и добычи углеводородов на лицензионных участках ПАО «НК «Роснефть» в Карском море, а также разработать мероприятия по снижению их негативного влияния на качество и безопасность работ.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: *Инженерно-геологические условия и новые данные о строении морского дна западной части Карского моря* / С.Л. Никифоров, Н.О. Сорохтин, Р.А. Ананьев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 11. – С. 14-18. – <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-11-14-18>
S.L. Nikiforov, N.O. Sorokhtin, R.A. Ananiev, et al., *Engineering-geological conditions and new data on the seafloor structure of the western part of the Kara sea* (In Russ.), *Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry*, 2024, No. 11, pp. 14-18, DOI: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-11-14-18>

В статье публикуются результаты исследований по изучению особенностей строения рельефа морского дна и верхней осадочной толщи, а также природных рисков в западной части Карского моря. Полученные в рамках работы результаты позволяют определить степень сложности инженерно-геологических условий и оценить риски, которые могут возникнуть при реализации проектов разведки и добычи углеводородов на лицензионных участках ПАО «НК «Роснефть» в Карском море, а также разработать мероприятия по снижению их негативного влияния на качество и безопасность работ.

Engineering-geological conditions and new data on the seafloor structure of the western part of the Kara sea

S.L. Nikiforov¹
N.O. Sorokhtin¹
R.A. Ananiev¹
A.I. Fridenberg²
A.A. Kolubakin³
E.A. Moroz⁴
E.A. Sukhikh⁴
Yu.G. Marinova¹

¹Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, RF, Moscow

²Rosneft Oil Company, RF, Moscow

³RN-Exloration LLC, RF, Moscow

⁴Geological Institute of the RAS, RF, Moscow

E-mail: nikiforov@ocean.ru, nsorokhtin@ocean.ru, ananyev@ocean.ru,
a_fridenberg@rosneft.ru, a_kolubakin@rn-exp.rosneft.ru, morozzea@gmail.com,
sukhikh_ea@mail.ru, marinova.ocean@gmail.com

Keywords: Kara Sea, seabed relief, geohazards, fluvial relief, paleogeography

Rosneft Oil Company continues to study modern geological and geomorphological processes, including natural hazards, to determine engineering-geological conditions in the development areas of the Arctic seas and conceptual design. The relevance of the problem is defined by the scale of tasks and new challenges that Russia faces in the 21st century as it continues to develop the Arctic's resources in exceptionally complex and dynamically changing natural and climatic conditions. Special attention should be paid to the following potentially hazardous processes and features: pockmarks (craters formed on the seabed by gas emissions); gas emissions into the waters; gas accumulations that create seismic-acoustic anomalies in the upper layers of the sedimentary strata; neotectonic deformations; ice scours; and the activity of intense currents. Submarine canyons are also an important geomorphological element of the Kara Sea seabed. They are characterized by sharp changes in relief and the presence of active lithodynamic processes, including hazardous ones. The formation of fluvial relief in the region under study is associated with both the classical development of river valleys and the erosive activity of glacial waters. The results obtained in this study will allow the authors to determine the complexity of the engineering geological conditions and assess the associated risks, that may arise during hydrocarbon exploration and production projects of Rosneft Oil Company license areas in the Kara Sea, as well as develop measures to reduce their negative impact on the quality and safety of operations.

В настоящее время происходит постепенное изменение природной обстановки на арктическом шельфе, в значительной степени связанное с сокращением площади ледового покрова. Поэтому особое значение приобретают вопросы обоснования наиболее вероятных сценариев развития прибрежной зоны и шельфа региона с целью минимизации ожидаемых природных рисков. Настоящая работа заключалась в проведении исследований инженерно-геологических условий в Карском море в районе лицензионного участка (ЛУ) Восточно-Приновоземельский-3 по материалам морских геолого-геофизических изысканий. В состав исследований входило изучение строения верхней осадочной толщи и рельефа морского дна, а также природных рисков в районе ЛУ Восточно-Приновоземельский-3.

Процессы формирования рельефа в Арктике значительно отличаются от таковых в других районах Мирового океана. Различия проявляются в характере взаимодействия современных рельефообразующих (в первую очередь волновых и ледовых) факторов, а также в особенностях развития рельефа в позднем плейстоцене и голоцене. Рельеф шельфа в позднечетвертичное время развивался под влиянием крупномасштабных колебаний уровня моря, в результате чего береговая линия перемещалась практически по всей площади шельфа и многие формы рельефа, расположенные в настоящее время ниже уровня моря, генетически связаны с процессами формирования берегов.

Карское море находится как под влиянием крупнейших океанических течений, которые формируют теплые атлантические воды и холодные арктические водные массы, так и под воздействием континентального стока. Две крупнейшие реки Сибири – Обь и Енисей – впадают в Карское море, а объемы стока так велики, что их влияние распространяется далеко на север, вплоть до северной оконечности побережья Новой Земли. Изменения современных природных обстановок происходят в тесном взаимодействии с древними экзогенными и эндогенными процессами, что формирует сложные геолого-геоморфологические ландшафты.

Изучение природных процессов в арктическом регионе в настоящее время вызывает большой интерес при планируемой активизации судоходства по трассе Северного морского пути (СМП) и промышленном освоении нефтегазовых месторождений. Для анализа потенциальных рисков и обоснования наиболее вероятных сценариев развития необходима разработка общей концепции формирования морского дна, содержащей информацию о геологическом строении, истории развития и современных природных геолого-геоморфологических процессах. К сожалению, часто игнорируется комплексный подход к решению этой задачи. Развитие подобных исследований возможно на границе разных отраслей знаний – геоморфологии, геологии, палеогеографии, геофизики, картографии, акустики, информатики и математического программирования. При этом геоморфологические исследования являются основой для изучения морфологии и динамики современного и древнего рельефов морского дна.

Экспедиционные арктические исследования [1, 2] показали широкое распространение геолого-геоморфологических процессов различного генезиса, что подтверждается результатами изучения детальной морфологии рельефа и строения верхней части осадочного чехла при помощи многолучевого эхолотирования и сейсмопрофилирования, выполненных в пределах ЛУ Восточно-Приновоземельский-3 в Карском море. По результатам исследований были выделены следующие потенциально опасные для человеческой деятельности объекты и процессы: покмарки (воронки, сформированные на дне выбросами газа); эмиссия газов в водную толщу (газовые факелы); борозды ледникового выпаживания; газовые скопления, формирующие аномалии сейсмоакустической записи в верхней части разреза; неотектонические деформации; активные литодинамические процессы.

Исследование процессов эмиссии природного газа со дна в водную толщу на шельфе арктических морей приобрело особое значение в течение нескольких последних десятилетий. Так, по некоторым оценкам, выделение большого количества метана в атмосферу в районах арктического шельфа может быть одной из причин климатических изменений со значительными экологическими последствиями. Большой интерес вызывают исследования форм рельефа, непосредственно связанных с процессами дегазации – покмарков, пингоподобных форм и др.

Айсберги и ледники представляют собой серьезный природный риск при освоении шельфа Арктики и СМП [3], следы ледовой экзарации отмечены на многих участках Баренцево-Карского шельфа. В результате нее происходит вспаживание морского дна подводной частью ледяных образований. В пределах приновоземельской части Карского моря современная ледовая экзарация происходит преимущественно за счет айсбергов, которые образуются в результате разрушения современных покровных льдов, в то время как в пределах перигляциального шельфа Карского моря она связана с сезонными или многолетними льдами.

Важными геоморфологическими элементами морского дна Карского моря являются подводные каньоны. Они характеризуются резкой изменчивостью рельефа и проявлением активных литодинамических процессов. Врезы каньонов заполняются, как правило, более мягкими с инженерной точки зрения грунтами. Подводные каньоны рассматриваются как опасный инженерно-геологический фактор при освоении морского дна, их изучению уделяется значительное внимание. По результатам выполненных исследований была дополнена геоморфологическая карта-схема западной части Карского моря [4], включая ЛУ Восточно-Приновоземельский-3. С учетом новых геолого-геофизических данных в районе исследований выделено большое число подводных долин, древних подводных эрозионных врезов и затопленных троговых долин (рис. 1).

По своему морфологическому облику и плановому расположению долины делятся на эрозионные и ледниковые. Эрозионные долины установлены на шельфе практически повсеместно. На их происхождение указывают признаки, характерные для речных долин совре-

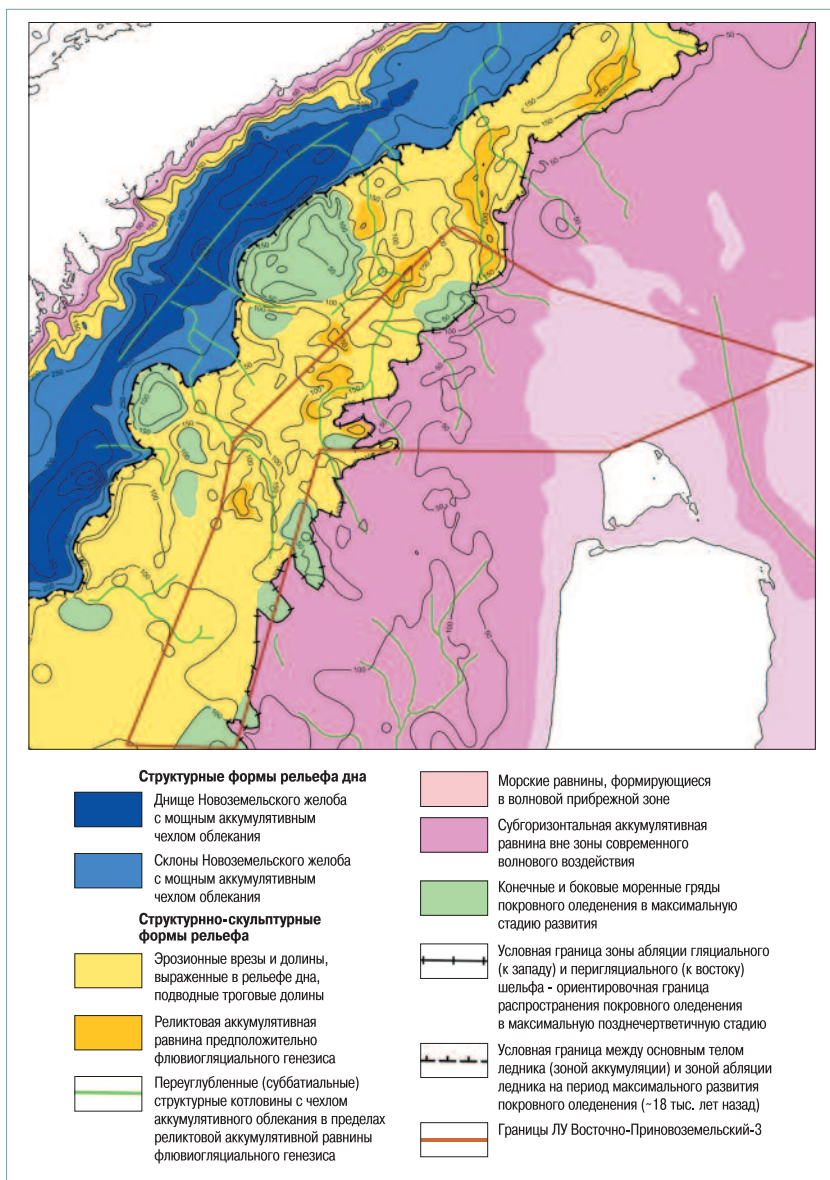


Рис. 1. Геолого-морфологическая карта-схема западной части Карского моря

менной суши: постепенное расширение вниз по течению, V-образные поперечные профили ряда мелких долин, плавные изгибы, в плане они образуют радиальные и концентрические системы, закономерно сочетающиеся с тектоническими структурами. В позднечетвертичное время каньоны были преобразованы флювиальными процессами, при которых формировались древние русла рек, а в ряде случаев – ледниковыми подвижками отступающего позднечетвертичного оледенения. Многие подводные долины продолжают современные речные долины.

Важный вклад в формирование морфоструктурного плана Карского шельфа внесли процессы рифтогенеза, определившие положение крупных водосборных бассейнов [5]. Южная часть территории длительное время находилась в режиме морского осадконакопления и интенсивной эрозии подверглась лишь в неоген-четвертичное время, в резуль-

тате чего и была сформирована сеть речных палеодолин. На территории шельфа в неоген-четвертичное время существовала разветвленная система палеорек различного масштаба. Основные речные долины наследовали положение отрицательных морфоструктур шельфа, представленных в основном рифтогенными прогибами и грабенами. В результате активной эрозии к позднечетвертичному ледниковому периоду шельф представлял собой эрозионно-денудационную равнину, сформированную на цокольном основании мезозойских пород.

Ледниковые долины отличаются от речных постоянной или слабо меняющейся шириной, относительной прямолинейностью. Для трогов характерны корытообразные (U-образные) поперечные профили с широким дном и крутыми вогнутыми бортами. Сохраняя корытообразную форму на одних участках, ледниковые долины могут быть и V-образными на других участках, обычно характеризующихся крутым падением рельефа (рис. 2).

На шельфе Карского моря смена плана речной сети выражается в образовании новых эрозионных врезов, параллельных древним долинам первой генерации и, вероятно, согласующихся с ними по общему направлению стока, при этом на смену речным факторам рельефообразования могли прийти ледниковые и наоборот. Вопрос о первичном генезисе долин и врезов является дискуссионным, так как существует вероятность, что они могли быть сформированы не только классическими флю-

виальными процессами, но и в результате эрозионной деятельности ледниковых каналов. На рис. 3 на поперечном профиле нижележащего более древнего вреза (показан синим цветом) можно выделить предполагае-

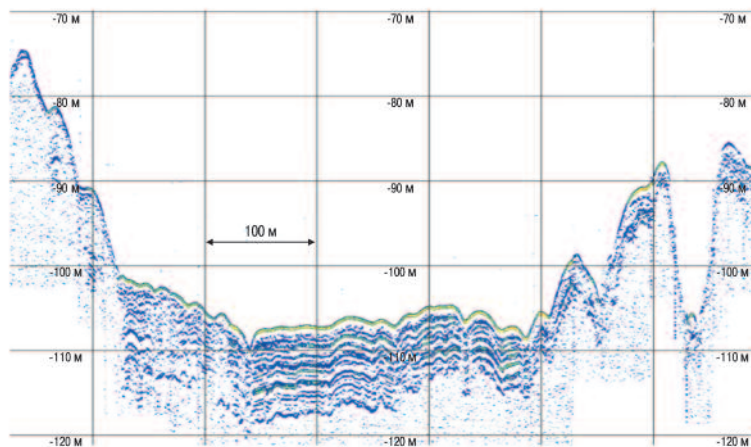


Рис. 2. Предполагаемые ледниковые каналы с U-образным (плоскодонным) и V-образным (небольшой по размеру каньон справа) поперечными профилями

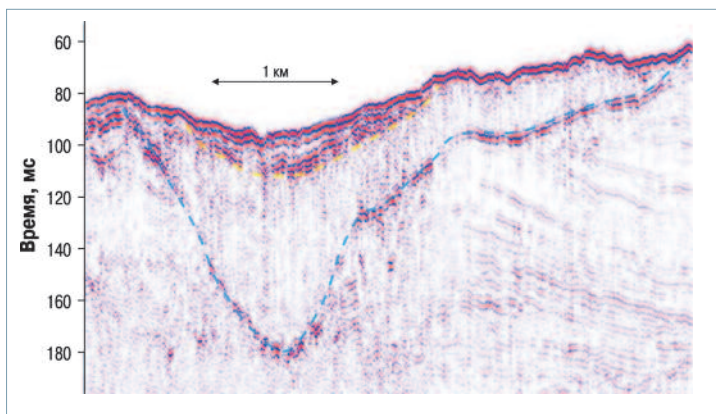


Рис. 3. Фрагмент сейсмопрофиля с двумя палеоврезами (синим цветом выделен более древний врез, желтым – врез, образованный в эпоху валдайского оледенения)

мые русло реки и несколько надпойменных террас, общая ширина вреза долины составляет около 5 км. Это позволяет предположить, что первоначально здесь существовала речная долина, которая в дальнейшем постепенно заполнялась осадками. В верхней части разреза выделяется предполагаемый ледниковый врез (показан желтым цветом), образованный в эпоху валдайского оледенения.

Рельеф морского дна и осадочная толща формируются в результате непрерывного, исторически обусловленного развития экзогенных, эндогенных и антропогенных процессов. Современный облик поверхности дна Карского моря является результатом деятельности различных геоморфологических процессов, которые наиболее активно протекали в позднем плейстоцене и голоцене. Исследования детальной морфологии рельефа и строения верхней части осадочного чехла при помощи многолучевого эхолотирования и сейсмопрофилирования, выполненные на полигонах в пределах ЛУ Восточно-Приновоземельский-3 в Карском море, позволили выявить области распространения опасных природных процессов, в том числе связанных с палеогеографическим развитием региона.

Полигон, расположенный к востоку от Пухучанской впадины, имеет глубину от 50 до 240 м, в среднем – 60–90 м (рис. 4). Преобладают субгоризонтальные поверхности и очень пологие склоны (до 4°), у грабенообразных по-

нижений и эрозионных врезов встречаются склоны средней крутизны (8–15°) и крутые (до 35°), для термокарстовых западин характерны склоны средней крутизны и пологие (4–8°). Полигон представляет собой эрозионно-денудационную равнину, образованную водно-ледниковыми и криогенными процессами с последующей голоценовой морской аккумуляцией, глубоко (до 160 м) расчлененную крупной грабенообразной долиной, к которой сходятся несколько неглубоких понижений схожего генезиса (см. рис. 4, а).

На полигоне можно выделить несколько различающихся между собой областей. В нижнем ярусе рельефа обнаруживаются глубокая грабенообразная долина, приуроченные к ней и расположенные на ее склонах многочисленные русла и сопутствующие им останцовые формы, несколько «рукавов» основной грабенообразной формы на севере, канал на юге территории (см. рис. 4, а). В верхнем ярусе рельефа выделяется фоновая равнина, в северной части полигона возвышенная, в южной – относительно пониженная.

Крупнейшая форма полигона – грабенообразная долина – представляет собой извилистую в плане депрессию длиной около 18 км и относительной глубиной до 160 м (см. рис. 4, а). Склоны крутые (в среднем 15–20°, на наиболее крутых участках – до 27–30°). Ширина депрессии по бровкам составляет 1,5–1,7 км в южной и центральной частях понижения и 2,8–3 км – в северной части. В южной и центральных сегментах долины на профилях выделяются мощные пачки склоновых отложений, несогласно перекрывающих горизонтально слоистые осадки предположительно руслового генезиса (см. рис. 4, б).

В днище понижения обнаружены валообразные повышения и разделяющие их ложбины. Самым крупным является вал длиной около 7 км в центральной части днища депрессии. Он имеет высоту 5–8 м и ширину 300–400 м. Мелкие ложбины опоясывают вал с обеих сторон. В северной части полигона на восточном борту днища можно обнаружить две террасоподобные поверхности на относительных высотах 30 и 60 м шириной соответственно 300–1000 и 400–600 м. Наиболее высокий террасоподобный уровень имеет почти горизонтальную поверхность, у наиболее низкой «террасы» поверхность расположена под углом 1–2°, местами до 4°.

Склоны грабена с обеих сторон осложнены обработанными эрозией поверхностями, состоящими из холмов останцовой природы и реликтами русел, создающими вокруг них понижения глубиной 30–50 м (рис. 4, в). Русла на этих поверхностях имеют признаки меандрирования. Склоны холмов характеризуются средней крутизной – 5–8°, иногда до 10°, вершины выположены. Ступенчатый характер склонов связан с их обрушением – появлением оползней и оседанием крупных блоков по трещинам, которые впоследствии были преобразованы флювиальными процессами.

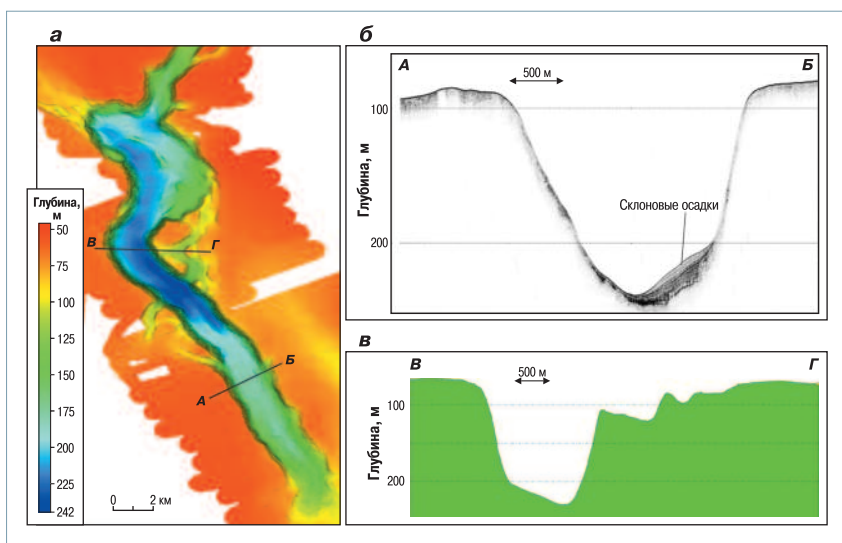


Рис. 4. Цифровая модель рельефа дна полигона (а) с линиями профилей А-Б (б) и В-Г (в)

Фоновая для полигона равнина находится на глубине от 50 до 90 м и может быть условно разделена на северную возвышенную часть и южную низменную. Возвышенная часть равнины характеризуется плавным рельефом и отсутствием видимых осложняющих вершинную поверхность форм. На этих холмах отмечается большое количество айсберговых борозд, покрывающих их пологие (до 2°) склоны и вершинные поверхности.

Сейсмоакустические разрезы на полигоне показали признаки наличия газа в приповерхностных осадках. По всей видимости, переработка отрицательных морфоструктур эрозионными и склоновыми процессами на фоне неотектонического прогибания стимулировала дегазацию в позднечетвертичное время.

Таким образом, в западной части Карского моря выявлены области сложнопостроенного рельефа, в пределах которых наблюдаются активные геологические процессы. Последние могут представлять опасность для функционирования инженерных объектов. На полигонах обнаружены области обрушения склонов, развития оползней. Нарушения верхней части осадочного разреза под влиянием неотектонического прогибания и эрозии приводят к появлению дегазации.

Предполагается, что на шельфе Карского моря к позднему плейстоцену существовала система флювиальных комплексов рельефа, которая была затоплена морем в ходе последней морской трансгрессии. С учетом значительной тектонической обусловленности макрорельефа Карского моря можно предположить, что часть флювиальных комплексов приурочена к дизъюнктивным нарушениям. Таким образом, закартированные формы флю-

виального рельефа в ряде случаев могут маркировать положение разломов (в том числе неотектонических) различного порядка.

Выводы

1. Уточнена геоморфологическая карта-схема западной части Карского моря, включая ЛУ Восточно-Приновоземельский-3. Разработана легенда карты и выделены структурные и структурно-скульптурные формы рельефа, области распространения подводных долин и врезов.

2. Результаты проведенного исследования свидетельствуют о широком распространении опасных природных процессов в районе ЛУ Восточно-Приновоземельский-3. Области повышенной газонасыщенности, оползни, разрывные нарушения, а также ледовая экзарация относятся к основным рискам в районе исследований.

3. Флювиальные формы рельефа широко распространены на территории западной части Карского моря. Их формирование ассоциируется как с классическим развитием речных долин, так и с эрозионной деятельностью ледниковых вод. Хорошая сохранность и выраженность в рельефе форм флювиального (флювиогляциального) генезиса на дне Карского моря указывает на молодой возраст их образования и возможную приуроченность к новейшим дизъюнктивным нарушениям на шельфе.

4. Проведенные исследования позволят создать комплексную систему обеспечения безопасности при освоении морских нефтегазовых месторождений.

Список литературы

1. Исследования в Баренцевом и Карском морях в 52-м рейсе НИС «Академик Николай Страхов» / С.Л. Никифоров, Н.О. Сорохтин, Р.А. Ананьев [и др.] // Океанология. – 2022. – Т. 62. – № 3. – С. 499–501. – <http://doi.org/10.31857/S0030157422030078>
2. Использование сейсмоакустического комплекса для исследования верхней осадочной толщи и рельефа морского дна в восточной Арктике / Н.Н. Дмитриевский, Р.А. Ананьев, Н.В. Либина, А.Г. Росляков // Океанология. – 2013. – Т. 53. – № 3. – С. 412–417. – <https://doi.org/10.7868/S0030157413020019>
3. Sea-ice ploughmarks in the eastern Laptev Sea, East Siberian Arctic shelf / R. Ananyev, N. Dmitrevskiy, M. Jakobsson [et al.] // Geological Society Memoir. – 2016. – V. 46. – № 1. – P. 301–302. – <https://doi.org/10.1144/M46.109>
4. Рельеф дна и строение верхней осадочной толщи западной части шельфа Карского моря в районе формирования нефтегазовых месторождений / С.Л. Никифоров, Н.О. Сорохтин, Р.А. Ананьев [и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2022. – № 8. – С. 46–50. – <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-46-50>
5. Геодинамика арктического шельфа России и рельефообразующие процессы в Центрально-Карском бассейне / Н.О. Сорохтин, С.Л. Никифоров, Р.А. Ананьев [и др.] // Океанология. – 2022. – Т. 62. – № 4. – С. 625–635. – <https://doi.org/10.31857/S0030157422040116>

References

1. Nikiforov S.L., Sorokhtin N.O., Anan'ev R.A. et al., *Research in Barents and Kara Seas during Cruise 52 of the R/V Akademik Nikolaj Strakhov* (In Russ.), Okeanologiya = Oceanology, 2022, V. 62, no. 3, pp. 499–501, DOI: <http://doi.org/10.31857/S0030157422030078>
2. Dmitrevskiy N.N., Anan'ev R.A., Libina N.V., Roslyakov A.G., *Utilizing a seismoacoustic complex for the study of the upper sedimentary stratum and seafloor relief in East Arctic* (In Russ.), Okeanologiya = Oceanology, 2013, V. 53, no. 3, pp. 412–417, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0030157413020019>
3. Ananyev R., Dmitrevskiy N., Jakobsson M. et al., *Sea-ice ploughmarks in the eastern Laptev Sea, East Siberian Arctic shelf*, Geological Society Memoir, 2016, V. 46, no. 1, pp. 301–302, DOI: <https://doi.org/10.1144/M46.109>
4. Nikiforov S.L., Sorokhtin N.O., Anan'ev R.A. et al., *Seabed relief and shallow sedimentary structure of the western part of the Kara Sea in the oil and gas fields area* (In Russ.), Neftyanoe khozyaystvo = Oil Industry, 2022, no. 8, pp. 46–50, DOI: <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2022-8-46-50>
5. Sorokhtin N.O., Nikiforov S.L., Anan'ev R.A. et al., *Geodynamics of the Russian Arctic Shelf and Relief-Forming Processes in the Central Kara Basin* (In Russ.), Okeanologiya = Oceanology, 2022, V. 62, no. 4, pp. 625–635, DOI: <https://doi.org/10.31857/S0030157422040116>