УДК 551.35.001.5
© Коллектив авторов, 2022

Рельеф дна и строение верхней осадочной толщи западной части шельфа Карского моря в районе формирования нефтегазовых месторождений

С.Л. Никифоров[1], Д.г.н.,
Н.О. Сорохтин[1], Д.г.-м.н.,
Р.А. Ананьев[1],
А.И. Фриденберг[2],
А.А. Колюбакин[3],
Е.А. Мороз[4], к.г.-м.н.,
Е.А. Сухих[4],
А.Г. Росляков[1]

[1]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
[2]ПАО «НК «Роснефть»
[3]ООО «РН-Эксплорэйшн»
[4]Геологический институт РАН

Адреса 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, arosl60@mail.ru

Seabed relief and shallow sedimentary structure of the western part of the Kara Sea in the oil and gas fields area

S.L. Nikiforov[1], N.O. Sorokhtin[1], R.A. Ananiev[1], A.G. Roslyakov[1], A.I. Fridenberg[2], A.A. Kolubakin[3], E.A. Moroz[4], E.A. Sukhikh[4]
[1]Shirshov Institute of Oceanology of the RAS, RF, Moscow
[2]Rosneft Oil Company, RF, Moscow
[3]RN-Exploration LLC, RF, Moscow
[4]Geological 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, arosl60@mail.ru

Keywords: Kara Sea, seabed relief, geomorphological mapping, paleogeography, submarine landforms

The Russian Arctic Shelf is a zone of priority national interests, because significant hydrocarbon reserves are concentrated in this region. At present, there is a gradual change in the natural environment, which necessitates the study of spatio-temporal patterns of the systemic development of the geological environment. The paper presents the results of scientific processing of field data obtained in the western part of the Kara Sea. The bottom relief of the Kara Sea was formed due to the continuous, historically determined development of anthropogenic and natural (exogenous and endogenous) processes. In the Late Quaternary, the relief changed as a result of alternations of glacial and interglacial natural settings and accompanying fluctuations in the level of the World Ocean, which led to the formation of morphogenetic complexes of glacial, glacial-marine, marine, and subaerial origin on the structures of the pre-Quaternary basement. Based on the results of the work carried out using materials from field studies, a geomorphological map-scheme of the western part of the Kara Sea was constructed. A map legend has been developed and structural and morphological forms of relief, including large lineaments, have been identified. The zones of ablation and accumulation of the glacial shelf were determined, the boundaries of the last Late Pleistocene glaciation were identified, and the main paleochannels of the rivers were mapped. Modern changes in natural conditions on the Arctic shelf are associated, to a large extent, with a reduction in the area of ice cover. In this regard, the issues of substantiating the most probable scenarios for the development of the coastal zone and the shelf of the region are of particular importance in order to minimize the expected natural risks. The results obtained as part of these studies will help minimize the risks in the implementation of hydrocarbon exploration and production projects in the licensed areas of Rosneft Oil Company in the Kara Sea by providing reliable initial information on engineering and geological conditions in the areas being developed.

Ключевые слова: Карское море, рельеф морского дна, геоморфологическое картографирование, палеогеография, подводные формы рельефа

DOI: 10.24887/0028-2448-2022-8-46-50

ПАО «НК «Роснефть» продолжает изучение инженерно-геологических условий освоения шельфа арктических морей с целью концептуального проектирования и организации геолого-разведочных работ. В статье впервые публикуются результаты работ по созданию геоморфологической карты западной части Карского моря на основе данных морских геолого-геофизических изысканий. Исследования базировались на авторской методике морфогенетического анализа формирования рельефа дна и верхней осадочной толщи. Полученные в рамках работы результаты позволят уменьшить риски при реализации проектов разведки и добычи углеводородов на лицензионных участках ПАО «НК «Роснефть» в Карском море за счет предоставления достоверных исходных данных.

Геология

Арктический шельф Российской Федерации является зоной приоритетных национальных интересов, так как в этом регионе сосредоточены значительные запасы углеводородов. При активизации техногенной (антропогенной) деятельности, включая освоение ресурсов, создание инфраструктуры, развитие транспортных коммуникаций и другие факторы индустриального развития, необходимо комплексное изучение геолого-геоморфологического строения территории с целью обоснования наиболее вероятных сценариев развития природных обстановок шельфа, в том числе уточнения концепции палеогеографического развития района. В статье описываются результаты исследований, осно-

ванные на натурных данных о строении рельефа и верхней осадочной толщи, полученных в районе лицензионных участков ПАО «НК «Роснефть» в Карском море.

Методика исследований

Основными натурными данными являлись материалы морских экспедиционных исследований на арктическом шельфе за 2011–2021 гг. [1, 2]. Изыскания выполнялись с помощью однолучевого и многолучевого эхолотирования, высокочастотного непрерывного сейсмоакустического профилирования, сейсмических исследований сверхвысокого разрешения и геологического пробоотбора.

Для районирования и типизации рельефа дна и верхней осадочной толщи за основу была принята авторская морфогенетическая классификация [3]. Классификация сформулирована специально для арктических морей с учетом ведущих рельефообразующих факторов и отражает характер специфических природных процессов, присущих высоким широтам. В ней одновременно учитывается сложное взаимодействие различных природных факторов, определяющих происхождение и морфологическую выраженность различных форм рельефа [4], поэтому классификацию можно назвать морфогенетической. Происхождение рельефа шельфа определяется не отдельно взятым тем или иным процессом, а сложным взаимодействием современных, палеогеографических экзогенных процессов с учетом его структурно-геологической принадлежности. В классификации выделяются доминирующие природные процессы, в результате влияния которых происходило и происходит формирование и изменение рельефа. Используя данный подход, можно определить какие опасные природные процессы в будущем будут усиливаться, а какие ослабевать.

Рельеф шельфа образован в результате непрерывного, исторически обусловленного развития природных экзогенных, антропогенных и эндогенных процессов [5]. Климатические условия оказывают определяющее влияние как на формирование рельефа шельфа, так и на весь комплекс рельефообразующих процессов, особенно в Арктике, а меняющиеся природные обстановки во время последней ледниковой эпохи и последующей эпохи дегляциации сформировали современный морфоструктурный облик рельефа шельфа. В Северном Ледовитом океане существуют два основных типа шельфов, имеющих разное палеогеографическое развитие: гляциальный, подвергавшийся воздействию четвертичных покровных ледников, и перигляциальный, не подвергавшийся их существенному воздействию [3]. Карское море занимает граничное местоположение и на западе имеет признаки гляциального, а на востоке - перигляциального шельфа.

Современный рельеф Карского моря представляет собой сложное сочетание структурных, структурно-скульптурных и скульптурных элементов разных генезиса и возраста. Структурная основа рельефа сформировалась в новейшее время геологического развития, а его преобразование в современный вид – главным образом в четвертичное время на фоне значительных колебаний уровня моря и климата. Для всех провинций характерен собственный морфоскульптурный рельеф, созданный экзогенными процессами и представленный следующими формами: ледниковыми деструктивными (ледниковые ванны, борозды выпахивания и др.) и ледниковыми аккумулятивными (морены, гряды и холмы ледниково-морской седиментации и др.); криогенными (локальные депрессии, бугры и др.); гидродинамическими (бенчи, останцы, аккумулятивные острова, косы и др.); флювиальными (прадолины, древние дельты, флювиогляциальный рельеф и др.) и гравитационными (оползневые, мутьевых потоков).

Результаты работ

В позднечетвертичное время рельеф дна Карского моря сформировался во время чередований реликтовых ледниковых и межледниковых природных обстановок и сопутствующих им колебаний уровня Мирового океана, которые привели к образованию на структурах дочетвертичного фундамента морфогенетических комплексов ледникового, ледниково-морского, морского и субаэрального происхождения.

По результатам выполненных исследований была построена геоморфологическая карта-схема западной части Карского моря, включая лицензионный участок (ЛУ) «Восточно-Приновоземельский-1» (рис. 1). Проведенные исследования подтвердили, что в результате особенностей развития на шельфе Карского моря широкое распространение получили древние (или реликтовые) формы рельефа: береговые линии (остатки древних берегов), затопленные бары, подводные моренные гряды (остатки от деятельности ледников), речные врезы, дельты и террасы (остатки от древних рек, которые существовали на осушенном шельфе в период регрессии моря) и др. Некоторые из этих форм погребены под толщей современных осадков, а часть разрушена в результате воздействия современных гидродинамических процессов. Однако многие древние формы рельефа не разрушены и хорошо выражены в рельефе, причем каждая из них имеет собственный морфологический облик и характеризуется специфическими осадками (речные дельты – преимущественно песчаные, древние моренные гряды – в основном валунно-галечные и т.д.).

Моренные гряды на шельфе, особенно если они расположены сериями, фиксируют осцилляции фронта ледниковых лопастей и отмечают стадии их развития, позволяя установить истинную площадь распространения ледниковых покровов на шельфе. Высота морены свидетельствует о толщине образовавшего ее ледника. На сейсмических разрезах моренные отложения представлены акустически проницаемыми осадками, на некоторых участках они выражены в рельефе морского дна (рис. 2).

Строение покровного ледника Карского моря по морфометрическим признакам можно разделить на основное аккумулятивное тело большой толщины (более 3 км) и подвижную краевую зону абляции с многочисленными бергшрундами, которая истончается к краю ледника. Граница между аккумулятивной частью ледника и зоной абляции в этом районе ориентировочно про-

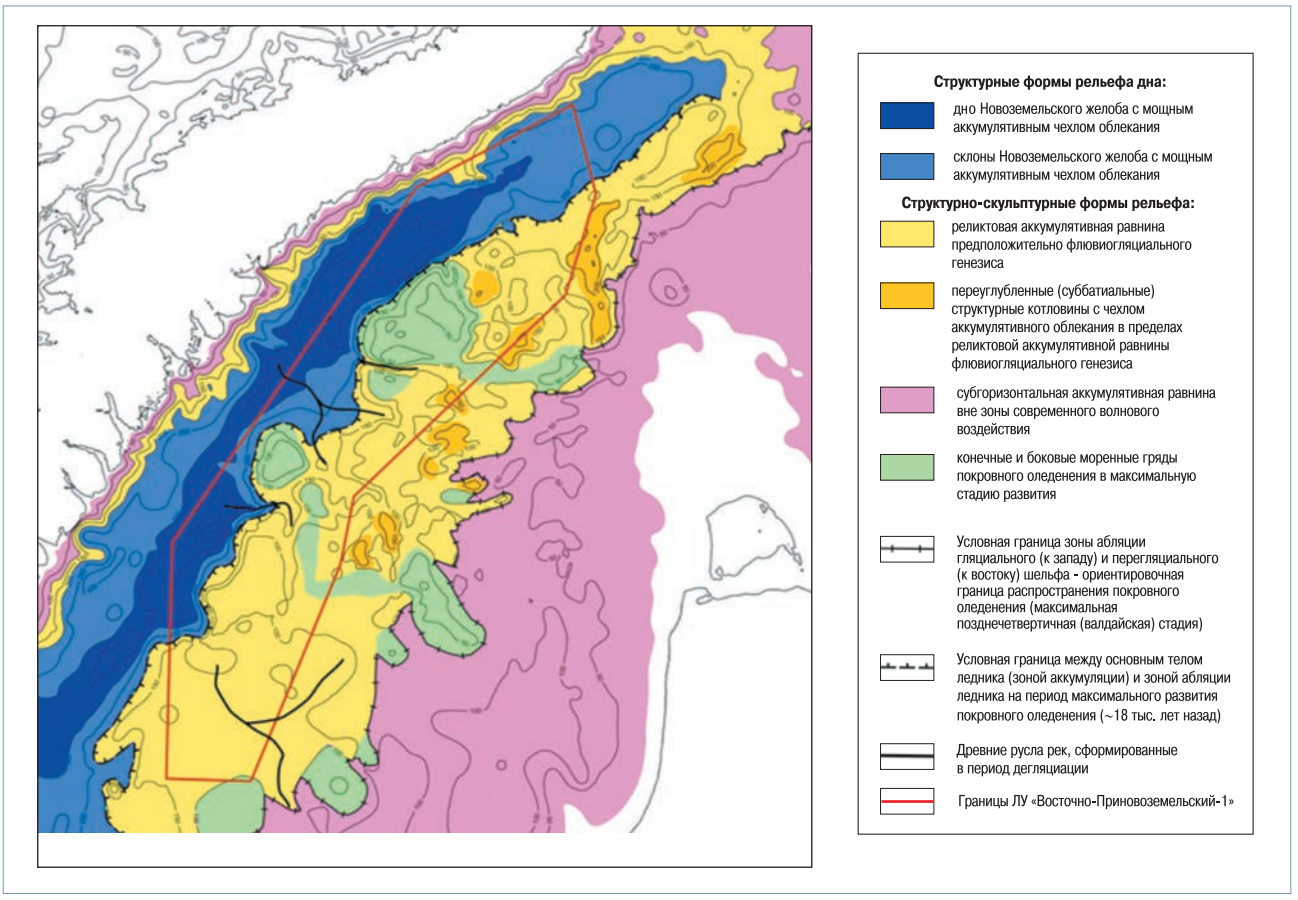

Рис. 1. Геоморфологическая карта-схема западной части Карского моря

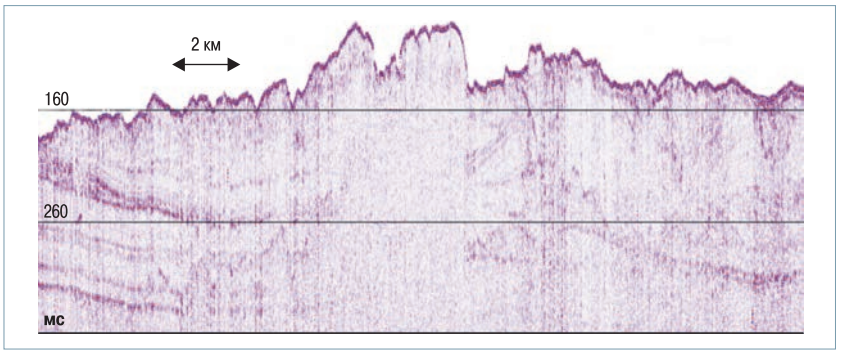

Рис. 2. Моренные гряды, выделенные по сейсмическим данным

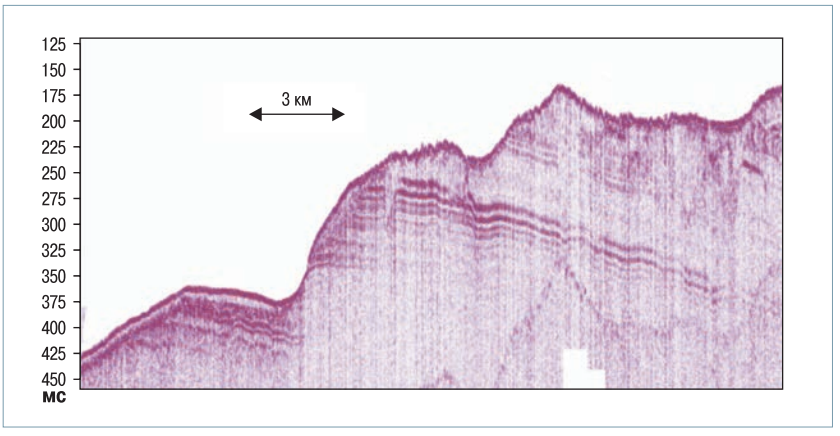

Рис. 3. Сейсмический разрез через дно и склон Новоземельского желоба

ходит в районе 200 м в пределах восточного борта Новоземельского желоба (см. рис. 1). Учитывая морфологию Новоземельского желоба (его замкнутость, большие глубины и др.), можно предположить, что здесь покровный ледник частично находился в плавучем состоянии.

Таким образом, бо́льшая часть самого глубокого участка дна в пределах Карского моря – Новоземельский желоб – в позднечетвертичное время развивался в подледных условиях с преобладанием процессов аккумуляции. На бортах и дне происходило интенсивное накопление материала ледового разноса. Дно желоба очень глубокое (глубина около 500 м) и представляет собой аккумулятивную поверхность (рис. 3). В настоящее время осадочный материал поступает преимущественно из морской взвеси и льда (ледовый разнос).

В зависимости от изменяющихся во времени соотношений аккумуляции и абляции происходили колебания края ледника. В случае существенного усиления питания и превышения его над таянием край ледника продвигается вперед, при обратном соотношении ледник отступает, а при длительно со-

храняющемся равновесии питания и расхода край ледника занимает стационарное положение. Кроме того, древние позднечетвертичные покровные ледники могли испытывать быстрые подвижки (пульсации, серджи), которые возникали в результате процессов, происходивших внутри самого ледника – скачкообразных перестроек условий на ложе и перераспределения вещества между областями аккумуляции и абляции без существенного изменения общей массы льда.

В целом наибольшая пластичность льда характерна для нижней части ледника в зоне абляции. В местах перегибов нижележащего рельефа дна на внешней границе ледника формируются разломы, называемые бергшрундами, и при приближении к окончанию ледника их число увеличивается.

В районе окончания покровного ледника (современные глубины шельфа около 100 м) были сформированы мощные конечные и боковые морены. Конечные (краевые) морены образуются в результате ледовой экзарации, а также в дальнейшем при определенной стабильности ледника, когда возникает динамическое равновесие между поступающим льдом и его таянием. В таких условиях на переднем краю ледника начинает накапливаться приносимый ледником обломочный материал, который и слагает конечную морену. Конечные морены в рельефе представляют собой изогнутые вало- или грядообразные возвышенности, в плане повторяющие очертания края ледникового потока. В морфологическом плане они представлены грядами или более или менее изолированными холмами толщиной до нескольких десятков метров и шириной до нескольких километров.

Моренные гряды, если они располагаются сериями, как на западе шельфа Карского моря, фиксируют осцилляции фронта ледниковых лопастей и отмечают стадии их развития, позволяя установить истинную площадь распространения ледниковых покровов. Таким образом, положение края ледника обычно реконструируется по конечным моренам, когда край ледника длительное время находился почти в неподвижном (стационарном) состоянии. В дальнейшем в период дегляциации талые воды отступавших ледников частично будут разрушать эти морены.

В зоне абляции между языками покровного оледенения могут формироваться и боковые морены в виде продольных валов или гряд. Часто две боковые морены соединяются в одну конечную морену подковообразной формы. Подводные краевые морены, как и конечные, являются крупнейшими сложными моренными образованиями (см. рис. 1).

К востоку от конечных моренных гряд расположены обширные субгоризонтальные равнины шельфа, которые в позднечетвертичное время развивались в субаэральных условиях. В период субаэрального развития в неоген-четвертичное время структурный рельеф шельфа претерпел изменения под влиянием денудации и последующих волновых процессов, которые протекали в условиях неоднократных изменений уровня океана, происходивших в этом регионе на фоне изостатических движений земной коры, связанных с периодическими ледниковыми нагрузками, сменявшимися деградацией ледников.

Максимум последнего в истории Земли оледенения приходится на период около 18 тыс. лет назад, в результате уровень океанов оказался почти на 120 м ниже современного уровня [5]. Позднее начался период дегляциации. Этот этап можно разделить на насколько стадий. Во время первой стадии (18–15 тыс. лет назад) произошло почти стремительное повышение уровня моря. Уже 15 тыс. лет назад уровень моря находился на отметках около 50 м, т.е. всего за 3–4 тыс. лет уровень моря поднялся на 50–100 м. Огромные объемы воды, необходимые для трансгрессии моря, связаны с интенсивным таянием ледника. В Карском море в первую очередь растаяли ледники в пределах зоны абляции, которые имели относительно небольшую толщину и были разбиты многочисленными разломами, что способствовало их быстрому прогреванию и, следовательно, таянию. Основное тело ледника прогревалось значительно медленнее, с одной стороны, из-за значительной толщины, с другой – меньшей степени расчлененности. С учетом данной геолого-геоморфологической обстановки между основным малоподвижным телом ледника, который находился в пределах восточного борта Новоземельского желоба (около 200 м), и конечными моренами, сформированными в период максимальной стадии оледенения (около 100 м), образовалась обширная флювиогляциальная (предположительно зандровая) равнина. В условиях трансгрессии она быстро заполнялась водой за счет таяния ледового комплекса абляции покровного оледенения.

При накоплении достаточного количества талых вод получили развитие эрозионные процессы, произошли частичное разрушение моренных гряд и ледовая экзарация, сформировались древние русла рек (их устьевые зоны, как правило, привязаны к 200-м изобате, т.е. уровню стояния основного тела ледника).

Вышеизложенные геолого-геоморфологические сценарии развития рельефа дна и верхней осадочной толщи в голоцен-позднечетвертичное время основаны на результатах натурных исследований. Так, один из полигонов детальных исследований располагался на правом борту Восточно-Новоземельского желоба (рис. 4). Рельеф дна изучаемого участка представляет собой область сложнопостроенного рельефа с сочетанием форм ледникового, ледового, руслового, структурно-тектонического и склонового генезиса.

Обнаруженные на полигоне параллельные гряды ЮЗ-СВ простирания интерпретируются как крупномасштабные ледниковые линеаменты. Они описаны в литературе и представляют собой тип рельефа ледниковых равнин, которые состоят из прямых ровных и параллельных, строго ориентированных по движению ледника гряд, сложенных донной мореной, и часто образуют большие поля. Этот рельеф называют также грядовым, бороздчатым, рифленым, желобчатым, или рельефом пашни.

Гряды СЗ-ЮВ направления имеют длину до 1900 м, высоту – в среднем около 4 м и интерпретируются как морены Де Геера, которые являются небольшими субпараллельными моренными грядами напорных морен. Они формируются в результате сезонных осцилляций отступающего ледника и расположены перпендикулярно его движению. В центральной части полигона об-

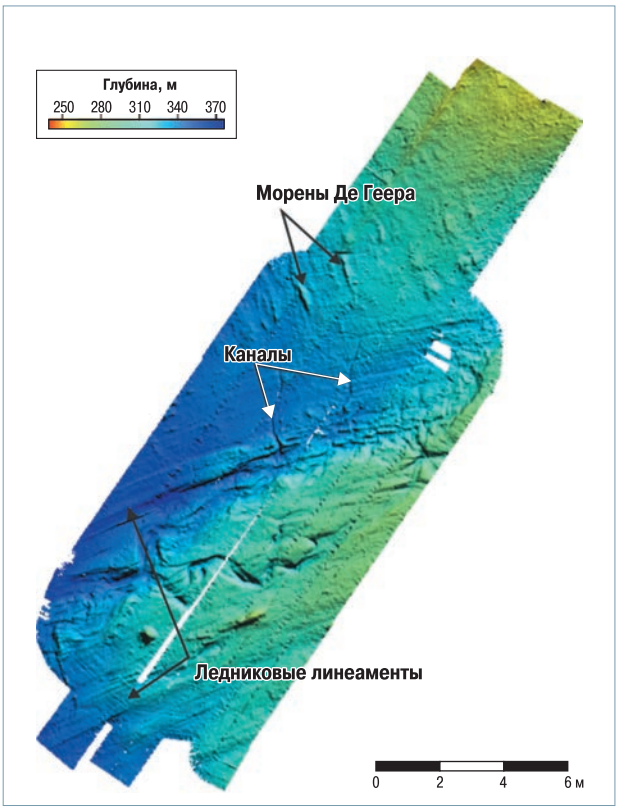

Рис. 4. Ледниковый и водно-ледниковый рельеф на полигоне к востоку от Восточно-Новоземельского желоба

наружены подледниковые каналы, которые также образовались при отступлении ледника (см. рис. 4).

Таким образом, установлено, что процессы ледникового морфолитогенеза оказали существенное влияние на формирование рельефа дна западной части Карского шельфа. Морфология этих форм и их морфометрические параметры позволили интерпретировать обнаруженный рельеф как ледниковый и водно-ледниковый. Полученные данные о строении рельефа морского дна и верхней осадочной толщи позволяют дополнить представления о конфигурации границ оледенения и направлении движения покровного ледника.

В настоящее время происходит постепенное изменение природной обстановки на арктическом шельфе, связанное в значительной степени с сокращением площади ледового покрова. В связи с этим приобретают особенное значение вопросы обоснования наиболее вероятных сценариев развития прибрежной зоны и шельфа региона для минимизации ожидаемых природных рисков. Результаты, полученные в ходе данных исследований, позволят минимизировать риски при реализации проектов разведки и добычи углеводородов на лицензионных участках ПАО «НК «Роснефть» в Карском море за счет предоставления достоверной исходной информации об инженерно-геологических условиях на осваиваемых участках.

Выводы

1. По результатам анализа условий формирования донного рельефа и верхней осадочной толщи составлена геоморфологическая карта-схема западной части Карского моря.

2. Карта построена с использованием натурных данных морских экспедиционных геолого-геофизических исследований, для районирования и типизации рельефа морского дна и осадочной толщи за основу была принята авторская морфогенетическая классификация.

3. Использование геоморфологической карты необходимо на этапах предварительной оценки сложности инженерно-геологических условий района, планирования геологических, геофизических и других видов исследований на лицензионных участках ПАО «НК «Роснефть» на шельфе Карского моря.

Список литературы

1. *Геолого-геофизические* исследования в морях Северного Ледовитого океана в 41-м рейсе научно-исследовательского судна «Академик Николай Страхов» в 2019 г. / С.Л. Никифоров, Р.А. Ананьев, Н.Н. Дмитревский [и др.] // Океанология. – 2020. – Т. 60. – № 2. – С. 334–336. - DOI: 10.31857/S0030157420010177

2. *Геолого-акустические* исследования в море Лаптевых в рейсе судна «Владимир Буйницкий» / Н.Н. Дмитревский, Р.А. Ананьев, А.А. Мелузов [и др.] // Океанология. – 2014. – Т. 54. – № 1. – С. 128–132. - DOI: 10.7868/S003015741401002X

3. *Seabed* Morphology of the Russian Arctic Shelf / Editor S. Nikiforov // Series Oceanography and Ocean Engineering. – NY: Nova Science Publishers, Inc., 2010.

4. *Геодинамическая* эволюция и морфоструктурный анализ западной части арктического шельфа России / Н.О. Сорохтин, С.Л. Никифоров, С.М. Кошель, Н.Е. Козлов // Вестник МГТУ. – 2016. – Т. 19. – № 1–1. – С. 123–137. - DOI: 10.21443/1560-9278-2016-1/1-123-137

5. *Потенциальная* нефтегазоносность западной части арктического шельфа России и прогнозные критерии поиска УВ сырья в прибрежной зоне Кольского полуострова. / Н.О. Сорохтин, Н.Е. Козлов, В.Н. Глазнев, И.В. Чикирев // Вестник МГТУ. – 2010. – Т. 13. – № 4–1. – С. 736–750.

References

1. Nikiforov S.L., Anan'ev R.A., Dmitrevskiy N.N. et al., *Geological and geophysical studies on cruise 41 of the R/V akademik Nikolaj Strakhov in Arctic seas in 2019* (In Russ.), Okeanologiya = Oceanology, 2020, V. 60, no. 2, pp. 334–336, DOI: 10.31857/S0030157420010177

2. Dmitrevskiy N.N., Anan'ev R.A., Meluzov A.A. et al., *Geological-acoustic studies in the Laptev Sea during the voyage of the Vladimir Buinitskii* (In Russ.), Okeanologiya = Oceanology, 2014, V. 54, no. 1, pp. 128–132, DOI: 10.7868/S003015741401002X

3. *Seabed morphology of the Russian Arctic shelf: edited by Nikiforov S.*, Series Oceanography and Ocean Engineering, NY: Nova Science Publishers, Inc., 2010.

4. Sorokhtin N.O., Nikiforov S.L., Koshel' S.M., Kozlov N.E., *Geodynamic evolution and morphostructural analysis of the western sector of the Russian Arctic shelf* (In Russ.), Vestnik MGTU, 2016, V. 19, no. 1–1, pp. 123–137, DOI: 10.21443/1560-9278-2016-1/1-123-137

5. Sorokhtin N.O., Kozlov N.E., Glaznev V.N., Chikirev I.V., *Potential oil and gas bearing of the western part of the Russian Arctic shelf and predictive criteria for the search for hydrocarbon raw materials in the coastal zone of the Kola Peninsula* (In Russ.), Vestnik MGTU, 2010, V. 13, no. 4–1, pp. 736–750.