

УДК 550.83(86)

## ОСАДОЧНЫЕ ВОЛНЫ ЮГО-ВОСТОЧНОГО ШЕЛЬФА БАРЕНЦЕВА МОРЯ (п-ов КАНИН–ЧЕШСКАЯ ГУБА)

© 2021 г. С. Л. Никифоров<sup>1</sup> \*, Р. А. Ананьев<sup>1</sup>, Н. Н. Дмитриевский<sup>1</sup>, Н. В. Либина<sup>1</sup>,  
Н. О. Сорохтин<sup>1</sup>, Е. А. Сухих<sup>2</sup>, А. А. Разумовский<sup>2</sup>, Г. А. Торопов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup>Геологический институт РАН, Москва, Россия

\*e-mail: [nikiforov@ocean.ru](mailto:nikiforov@ocean.ru)

Поступила в редакцию 15.10.2020 г.

После доработки 27.12.2020 г.

Принята к публикации 12.01.2021 г.

Осадочные волны представляют собой серии волнообразных аккумулятивных образований разной морфологической выраженности. Эти формы рельефа являются наложенными на подстилающую поверхность с четким стратиграфическим несогласием, одним из главных рельефообразующих факторов являются гидрофизические процессы. В 38-м и 41-м рейсах НИС “Академик Николай Страхов” (2018–2019 гг.) между полуостровом Канин и горлом Чешской губы было выполнено картирование морского дна и получены новые данные о формировании этих осадочных образований. Полученные в летнее время (июль–август) данные о формировании этих осадочных образований свидетельствуют о быстрых изменениях природных обстановок. Наличие опасных природных процессов и современных геолого-геоморфологических рисков определяет уровень угроз, особенно при активизации судоходства в условиях увеличения сроков навигации по трассе Северного морского пути.

**Ключевые слова:** Арктика, Баренцево море, Чешская губа, геология, геоморфология, природные риски, динамика рельефа и картирование морского дна, осадочные волны, придонные течения, батиметрия, приливо-отливные течения

**DOI:** 10.31857/S0030157421040122

### ВВЕДЕНИЕ

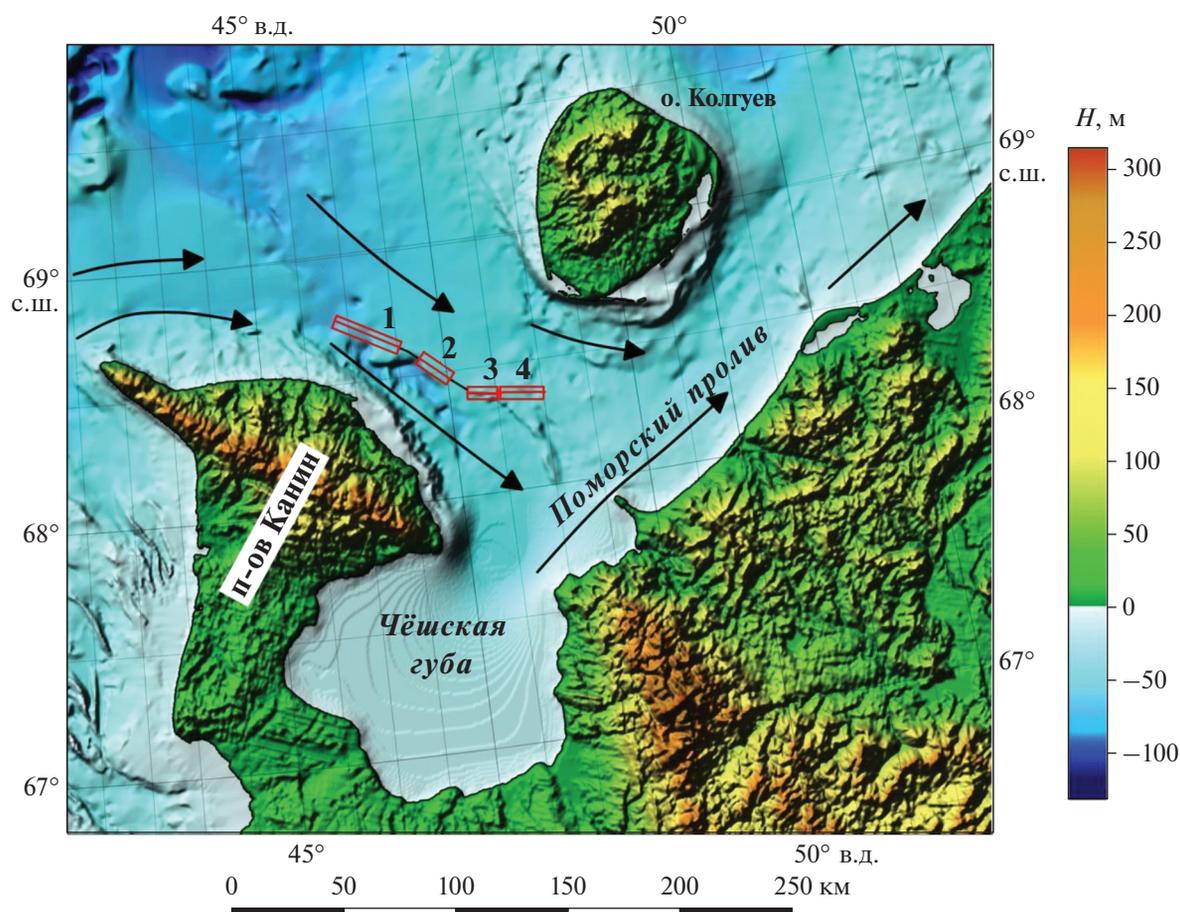
В настоящее время происходит изменение природных обстановок на арктическом шельфе, в том числе связанное с сокращением площади ледового покрова. Как следствие, происходит усиление гидродинамического режима, что приводит к усилению термоабразивных процессов на побережье и увеличению объема выноса осадочного материала в зону прибрежного мелководья. Эти явления могут изменить фарватер Северного морского пути, который в ряде районов находится в относительной близости к береговой линии. Поэтому исследования особенностей развития современных геолого-геоморфологических процессов на арктическом шельфе приобретают особую значимость.

Экспедиционные работы в 38-м и 41-м рейсах НИС “Академик Николай Страхов” в 2018–2019 гг. проводились сотрудниками ИО РАН при участии ряда других организаций [10, 12]. В юго-восточной части шельфа Баренцева моря, по данным сейсмоакустического картирования морско-

го дна, были обнаружены песчаные осадочные волны различной морфологической выраженности. Осадочные волны представляют собой серии волнообразных образований аккумулятивного генезиса, подобные формы рельефа широко распространены в различных морях Мирового океана на мелководье и в глубоководных районах [8, 15, 21, 22]. Миграция и изменение характеристик песчаных волн представляют опасность для судоходства, в результате действия этих процессов существует вероятность обнажения подводных трубопроводов и кабелей, повышая риск их повреждения [18].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

НИС “Академик Николай Страхов” оборудован штатной судовой гидроакустической системой картирования морского дна фирмы *Reson*, использовавшейся по всему маршруту движения судна и включающей в себя многолучевой эхолот *SeaBat 8111* с рабочей частотой 100 кГц и сейсмо-



**Рис. 1.** Район исследований, цифрами указаны номера полигонов, черными стрелками показаны местные течения (по [1]). Картографическая основа построена по [11].

профилограф *EdgeTech 3300* с частотами от 2 до 12 кГц.

Помимо судового комплекса, для получения первичных данных использовалось оборудование высокочастотного гидроакустического комплекса в составе многолучевого эхолота *WASSP WMB-3250* с частотой 160 кГц и эхолота-профилографа *SES-2000 Standard* с рабочими частотами от 4 до 15 кГц, приемно-передающие антенны этих приборов крепились на опускающуюся поворотную штангу.

Район работ располагался между п-вом Канин и горлом Чешской губы, по результатам выполненных батиметрических и сейсмоакустических исследований по морфологическим признакам было выделено четыре полигона (рис. 1).

При описании рельефа морского дна за основу была принята морфогенетическая классификация [19, 20]. На данный момент разработан ряд классификаций рельефа, в основе которых заложены палеогеографические события, либо струк-

турно-тектонические особенности, современные процессы, морфометрические параметры и т.п. [3, 5, 7, 19, 20].

Создание идеальной научной систематизации тех или иных природных объектов, которая удовлетворяла бы абсолютно всем требованиям, вряд ли возможно. Одна из первых попыток создания классификации рельефа на морфогенетических принципах была предпринята в конце XX века [4]. В ее основу была положена роль ведущих рельефообразующих активных и пассивных факторов и процессов в их сложном взаимодействии, следствием чего является образование определенных форм рельефа или их комплексов. Однако эта классификация была генерализирована и в ней не были учтены региональные особенности формирования рельефа шельфа Арктики. В основу используемой авторами классификации [19, 20] положен анализ происхождения, морфологии, геологического строения форм рельефа шельфа именно арктических морей.

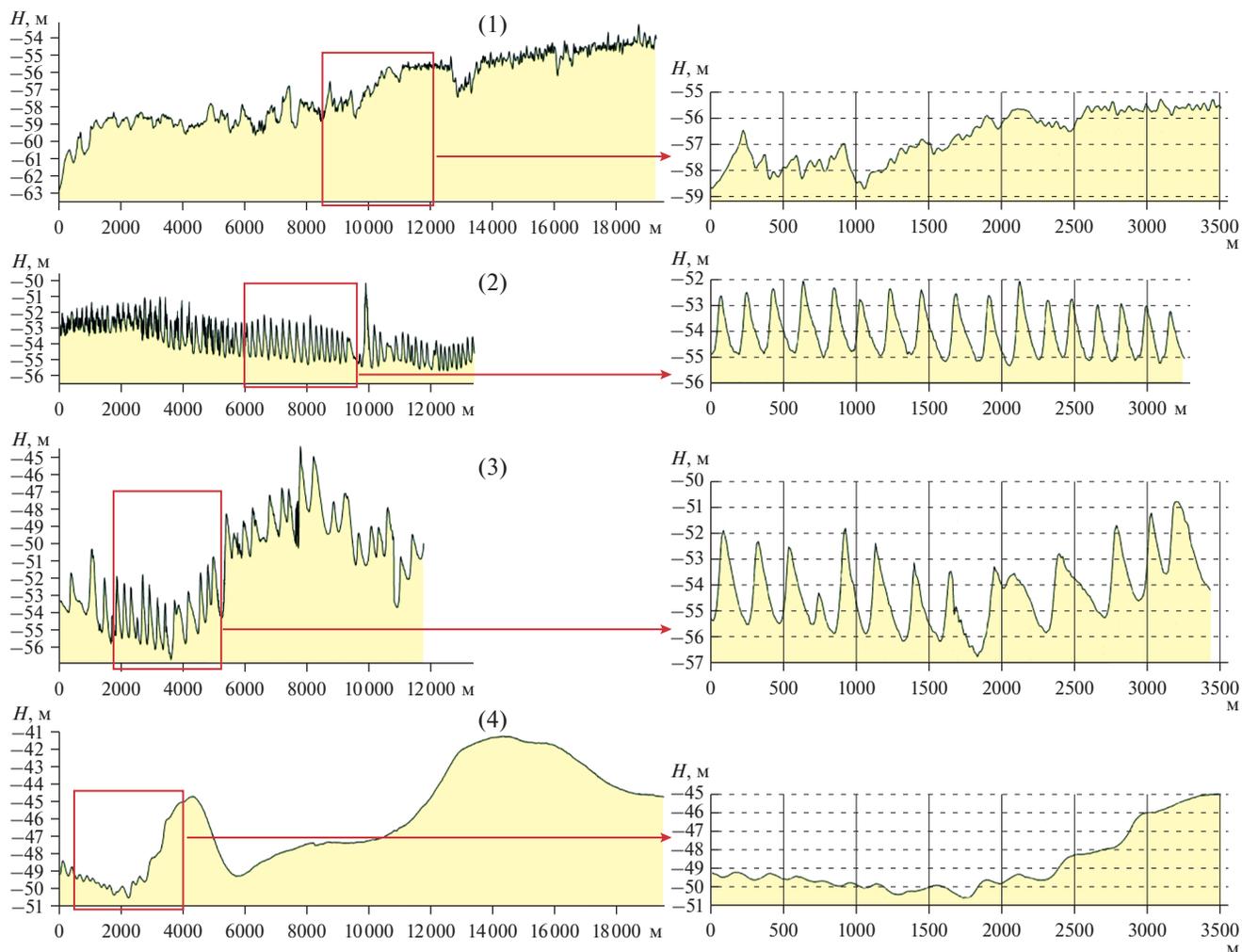


Рис. 2. Рельеф морского дна на полигонах 1–4, местоположение полигонов показано на рис. 1.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

Обнаруженные на полигонах 1–4 (рис. 2) аккумулятивные формы мезорельефа можно разделить на два основных типа. Осадочные волны образуют серии до более 40 следующих друг за другом ритмичных образований (ширина их основания – до 500 м), в то время как осадочные гряды имеют более значительные размеры и чаще формируются как одиночные валообразные структуры.

Согласно сейсмоакустическим данным, аккумулятивные формы рельефа дна на полигонах имеют отличающиеся морфологические параметры, но все они являются наложенными образованиями, обычно с резкой стратиграфической границей с подстилающей поверхностью (рис. 3). Необходимо отметить, что песчаный материал на поверхности дна препятствуют распространению высокочастотных акустических

сигналов, поэтому в некоторых случаях под слоем песков наблюдаются лишь фрагменты отражающих границ.

Общая длина полигона 1 – около 20 км с относительным перепадом высот около 10 м. Поверхность осложнена грядами разного порядка. Наиболее крупные имеют ширину основания 1–2 км и более, на некоторых из них расположены относительно небольшие рифели с шириной основания – метры. Относительная высота гряд первого порядка составляет 5–8 м, рифелей – около полуметра. Полигон 4 также расположен на положительной структуре с приблизительно одинаковым относительным перепадом высот. Подстилающая поверхность четко фиксируется на сейсмоакустической записи и представлена сильно расчлененной поверхностью, сформированной предположительно в позднем плейстоцене. Расчлененность рельефа дна, вероятно, связана с активизацией

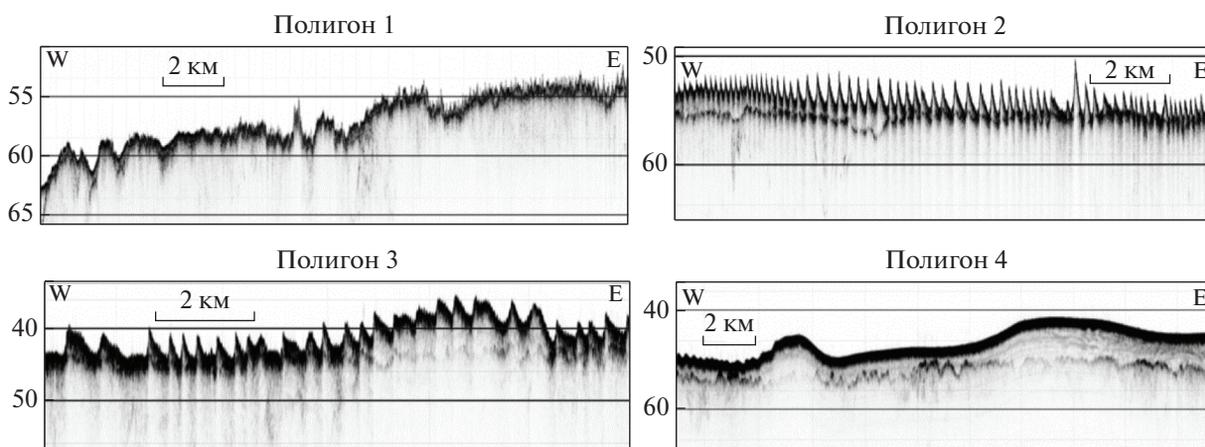


Рис. 3. Сейсмоакустические разрезы на полигонах 1–4 по данным сейсмопрофилирования.

флювиальных процессов во время последнего регрессивно-трансгрессивного изменения уровня моря. В пределах полигона обнаружено две крупные осадочные гряды с разной шириной основания – от 2 до 10 км и более, относительная высота – около 8 м.

На полигонах 2 и 3 осадочные волны четко выражены в рельефе дна (рис. 2, 3). На полигоне 2 их относительная высота достигает 6 м, ширина основания – до 200 м, количество гряд на 1 км – около 5, форма симметричная. На полигоне 3 осадочные волны имеют приблизительно одинаковую с полигоном 2 относительную высоту, но они более мощные – ширина основания 200–500 м, количество на 1 км – от 3 до 5. Форма ассиметричная, западный склон более крутой, а восточный выположен. Ассиметричная форма и высокая крутизна западного склона, вероятно, связана, в отличие от полигона 2, с более сильным придонным течением, что приводит к быстрым изменениям рельефа дна.

Согласно данным пробоотбора, осадочные волны сложены средне-крупнозернистым, хорошо сортированным песком темно-желтого цвета кварц-полевошпатового состава с обломками алевролита красного цвета размером до 5 мм с небольшим количеством двустворчатых раковин и других фракций.

Полигон 3 с осадочными волнами, обнаруженными в августе 2018 г., был повторно закартирован в июле 2019 г. с целью определения динамики положения этих форм рельефа в пространстве. Гребни волн ориентированы по нормали к направлению течений. Выполненный дублирующий профиль свидетельствует о динамике изменения осадочных волн, составляющей от десятков сантиметров до метров в год (рис. 4).

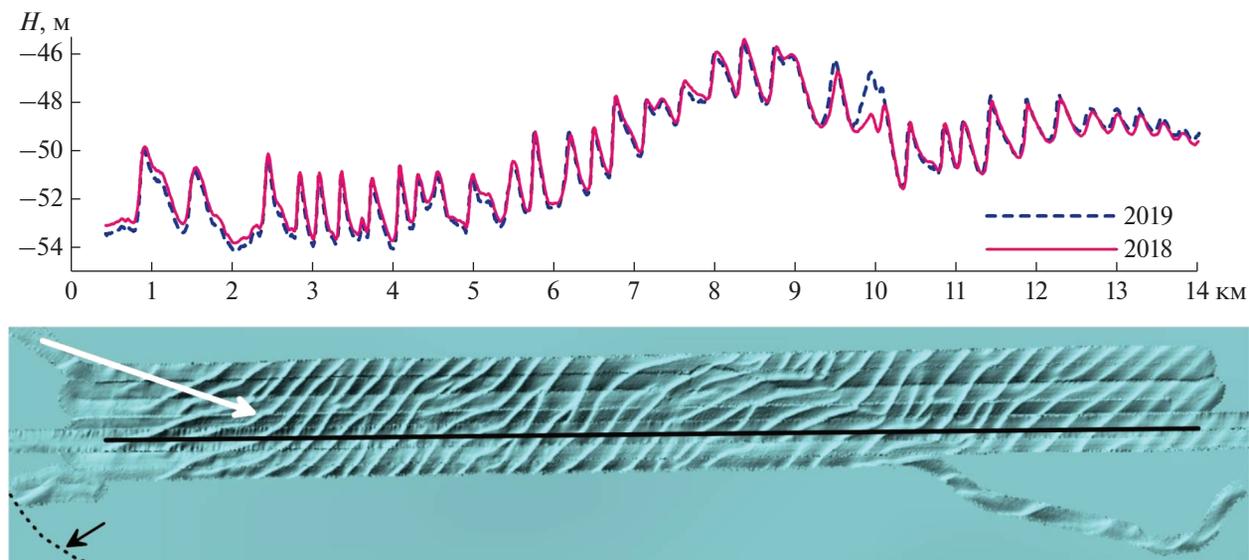
## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гидрологический режим Баренцева моря во многом определяется системой квазистационарных и нестационарных течений, а также приливными движениями [1]. В Печорском море система общей квазистационарной циркуляции формируется Канинским и Колгуево-Печорским потоками теплых и соленых вод атлантического происхождения, Беломорским и Печорским сточными течениями, а также притоком холодных вод из Карского моря течением Литке [2]. Водобмен Чешской губы с открытой акваторией Баренцева моря осуществляется приточным течением вдоль Канинского побережья и сточным по северо-восточной периферии губы (рис. 1), при этом скорость преобладающих поверхностных течений достигает 0.5 узла [1, 2].

Баренцево море относится к морям приливного типа, скорость приливных течений здесь значительно больше скорости постоянных неперидических течений [14]. Приливо-отливные течения в западной части Печорского моря имеют реверсивный характер, близкий к правильному полусуточному, и вызывают значительные колебания уровня моря, в Чешской губе амплитуда колебаний достигает 320 см [2, 14].

В Чешскую губу с юга впадает большое количество рек (Великая, Пеша, Черная, Ома и др.), обеспечивающих интенсивную поставку осадочного материала разной размерности (преимущественно песков) за счет речного стока [20]. Кроме того, северо-восточное побережье п-ва Канин в настоящее время подвергается абразии [9], что также является источником поставки осадочного материала.

Выполненные ранее исследования позволили сделать вывод о том, что осадочные волны фор-



**Рис. 4.** Осадочные волны на полигоне 3. Снизу — акустическое изображение полигона по данным многолучевого эхолота. Белая стрелка указывает направление течения, а черная — направление на береговую линию по нормали. Сверху — профили морского дна, полученные в результате повторного картирования в 2018 и 2019 гг., черной линией снизу показано расположение профилей.

мируются постоянными во времени, нестратифицированными потоками с высокой концентрацией материала [23].

Район работ характеризуется активным гидродинамическим режимом, что приводит к интенсивной абразии берегов и дна, а также к переработке и сортировке обломочного материала с образованием полей песчаных осадочных волн. Их длинные оси ориентированы перпендикулярно направлению течений (рис. 4), как и на других шельфах, где были обнаружены подобные приливо-отливные формы рельефа [6, 21].

На полигонах 1 и 4 были обнаружены осадочные гряды, полигоны 2 и 3 — области развития осадочных волн. Образование разных форм аккумулятивного рельефа на близлежащих участках связано с тем, что геолого-геоморфологические обстановки на полигонах отличаются друг от друга. На границах между участками 1 и 2, а также между участками 3 и 4 выделяются достаточно резкие поднятия морского дна (рис. 1), которые могут служить своеобразным барьером для приливо-отливных волн, что ведет к изменению гидродинамического режима. В соответствии с картой распространения грунтов [13], вблизи этих границ меняется тип донных осадков — с чистого песка на илистый, что ведет к изменению условий формирования аккумулятивных форм рельефа.

Важная роль изначального рельефа дна в образовании осадочных волн подтверждена предыдущими исследованиями [16], моделирование пове-

дения потока над волнистым рельефом показало заметно более высокое осаждение в понижениях [17]. Сильная расчлененность современной подстилающей поверхности, выделяемой на сейсмических разрезах (рис. 3), вероятно, стимулировала формирование осадочных волн в данном месте.

Таким образом, осадочные волны в юго-восточной части шельфа Баренцева моря в проливе между п-вом Канин и горлом Чешской губы являются экзогенными скульптурными формами рельефа шельфа, созданными гидрофизическими процессами — придонными или приливоотливными течениями. Формирование и развитие осадочных волн связано с особенностями гидрофизического режима и подстилающей поверхности, а их быстрая изменчивость во времени представляет природный геориск, что необходимо учитывать при индустриальном освоении и активизации судоходства по трассе Северного морского пути.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 38-м и 41-м рейсах НИС “Академик Николай Страхов” (2018–2019 гг.) между п-вом Канин и горлом Чешской губы было выполнено картирование морского дна. В результате обнаружены осадочные волны, которые представляют собой серии волнообразных аккумулятивных образований разной морфологической выраженности. Эти формы рельефа являются наложенными об-

разованиями на подстилающую поверхность с четким стратиграфическим несогласием, одним из главных рельефообразующих факторов являются гидрофизические процессы. Осадочные волны сложены хорошо сортированным песком кварц-полевошпатового состава.

Обнаруженные аккумулятивные формы мезорельефа можно разделить на две группы – осадочные волны в пределах полигонов 2, 3 и гряды на полигонах 1, 4. Их формирование происходит под влиянием совместного кумулятивного воздействия вдольберегового течения и мощного приливо-отливного течения. Разная морфологическая выраженность этих осадочных образований свидетельствует о различном гидродинамическом режиме в районах их распространения.

Осадочные волны характеризуются быстрым изменением рельефа, что представляет потенциальные геориски. Данные повторного профилирования, выполненного в 2018 и 2019 гг., свидетельствуют о быстрой динамике осадочных волн, составляющей метры в год. Наличие опасных природных процессов и современных геолого-геоморфологических рисков определяет уровень угроз, особенно при активизации судоходства в условиях увеличения сроков навигации по трассе Северного морского пути.

**Благодарности.** Авторы благодарят руководство и экипаж НИС “Академик Николай Страхов” за помощь в проведении работ.

**Источники финансирования.** Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИО РАН № 0149-2019-0006, финансирование исследований сотрудников ГИН РАН осуществлялось за счет грантов РФФИ №№ 18-35-20060 и 18-05-70040.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас Мурманской области. М.: Главное управление геодезии и картографии при совете министров СССР, 1971. 45 с.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 1. Баренцево море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 279 с.
3. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
4. *Ионин А.С., Павлидис Ю.А., Юркевич М.Г.* Морфогенетическая классификация форм рельефа шельфа Мирового океана // Современные процессы осадконакопления на шельфах Мирового океана. М.: Наука, 1990. С. 24–50.
5. *Каплин П.А.* Новейшая история побережий Мирового океана. М.: Изд-во МГУ, 1973. 265 с.
6. *Левченко О.В., Щербаков Ф.А.* Приливно-отливные формы мезорельефа и структура донных осадков восточной части Белого моря (по данным высоко- разрешающей сейсмоакустики) // Докл. РАН. 2000. Т. 372. № 6. С. 796–800.
7. *Леонтьев О.К., Гершанович Д.Е.* Шельф: некоторые вопросы терминологии, геоморфологии и геологической истории // Проблемы геологии шельфа. М.: Наука, 1975. С. 13–19.
8. *Лонгинов В.В.* Очерки литодинамики океанов. М.: Наука, 1973. 243 с.
9. *Лукьянова С.А., Соловьева Г.Д.* Абразия морских берегов России // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2009. № 4. С. 40–44.
10. *Никифоров С.Л., Ананьев Р.А., Дмитриевский Н.Н. и др.* Геолого-геофизические исследования в морях Северного Ледовитого океана в 41-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в 2019 г. // Океанология. 2020. Т. 60. № 2. С. 334–336.
11. *Никифоров С.Л., Кошель С.М., Либина Н.В.* Цифровая модель рельефа дна Белого и Баренцева морей // Геоинформатика. 2018. № 2. С. 32–36.
12. *Никифоров С.Л., Сорохтин Н.О., Дмитриевский Н.Н. и др.* Комплексные исследования в 38-м рейсе НИС “Академик Николай Страхов” в Баренцевом море // Океанология. 2019. Т. 59. № 5. С. 885–887.
13. *Новиков М.А.* Применение цифровой модели донных отложений Баренцева моря для анализа загрязнения // Вестник Кольского научного центра РАН. 2018. № 10. С. 1–5.
14. *Попов С.К.* Моделирование и прогноз изменений уровня и скорости течений в морях России. Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2019. 46 с.
15. *Путанс В.А.* Осадочные волны: современное состояние знаний // Бюл. МОИП. Отд. Геол. 2012. Т. 87. Вып. 1. С. 25–37.
16. *Kubo Y., Nakajima T.* Laboratory experiments and numerical simulation of sediment wave formation by turbidity currents // Mar. Geol. 2002. V. 192. P. 105–121.
17. *Lamb M.P., Toniolo H., Parker G.* Trapping of sustained turbidity currents by intraslope minibasins // Sedimentology. 2006. № 53. P. 147–160.
18. *Morelissen R., Hulscher S.J.M.H., Knaapen M.A.F., Németh A.A., Bijker R.* Mathematical modelling of sand wave migration and the interaction with pipelines // Coastal Engineering. 2003. V. 48. P. 197–209.
19. *Nikiforov S.L., Pavlidis Yu.A., Rachold V., Grigoryev M.N., Rivkin F.M., Ivanova N.V., Koreisha M.M.* Morphogenetic classification of the Arctic coastal zone // Geo-Mar. Lett. 2005. V. 25. № 2. P. 89–97.
20. Seabed Morphology of the Russian Arctic Shelf / *Nikiforov S.* (ed.). N.Y.: Nova Science Publishers, 2010. 202 p.
21. *Swift D.J.P.* Tidal sand ridges and shoal-retreat massifs // Marine Geol. 1975. V. 18. № 2. P. 105–134.
22. *Viana A.R., Faugères J.C., Stow D.A.V.* Bottom-current-controlled sand deposits — a review of modern shallow-to deep-water environments // Sedimentary Geology. 1998. V. 115(1–4). P. 53–80.
23. *Wynn R.B., Stow D.A.V.* Classification and characterization of deep-water sediment waves // Mar. Geol. 2002. V. 192. P. 7–22.

## Sedimentary Waves of the Southeastern Part of the Barents Sea Shelf (Kanin Peninsula–Cheshskaya Bay)

S. L. Nikiforov<sup>a, #</sup>, R. A. Ananiev<sup>a</sup>, N. N. Dmitrevsky<sup>a</sup>, N. V. Libina<sup>a</sup>, N. O. Sorokhtin<sup>a</sup>,  
E. A. Sukhikh<sup>b</sup>, A. A. Razumovskii<sup>b</sup>, G. A. Toropov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: nikiforov@ocean.ru*

Sedimentary waves are represented by a series of wavelike accumulative features of various morphological expressions. These morphological forms are superimposed on the underlying surface with a clear stratigraphic unconformity. The hydrophysical processes are the main relief-forming factors of such features. During the 38 (2018) and 41 (2019) expeditions of the R/V *Akademik Nikolay Strakhov* the mapping of the seabed between the Kanin peninsula and the inlet of the Cheshskaya bay was conducted and the new data was gained regarding sedimentary waves morphology. New data obtained in the summer season (July–August) of 2019 shows quick changes of the natural hydrodynamic environment influencing the alternation of the sedimentary waves. Occurrence of hazardous natural processes, geological and geomorphological risks and the level of threats, especially in relation with the conduction of prolonged navigation period along the Northern Sea Route were identified.

**Keyword:** Arctic, the Barents Sea, the Cheshskaya Bay, geology, geomorphology, natural risks, relief dynamics and the sea floor mapping, sedimentary waves, bathymetry, bottom currents, tidal currents