— МОРСКАЯ ГЕОЛОГИЯ —

УДК 681.883

ВОЛНОВЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА ДНА ПЕЧОРСКОГО МОРЯ В ПРОЛИВЕ МЕЖДУ ПОЛУОСТРОВОМ КАНИН И ОСТРОВОМ КОЛГУЕВ

© 2025 г. Н. Н. Дмитревский^{1, *}, Н. В. Либина^{1, **}, Е. А. Сухих²

¹ Институт океанологии им. П.П. Шириюва РАН, Москва, Россия ² Геологический институт РАН, Москва, Россия *e-mail: nnd2008@rambler.ru **e-mail: lnatvit@mail.ru Поступила в редакцию 06.06.2024 г. После доработки 09.09.2024 г. Принята к публикации 22.11.2024 г.

В экспедициях Института океанологии 38-го и 41-го рейса НИС "Академик Николай Страхов" РАН (2018–2019 гг.) в Печорском море между полуостровом Канин и островом Колгуев выявлено большое количество аккумулятивных песчаных форм донного рельефа и дана характеристика ряду их параметров. В 2022 г. (51-й рейс НИС "Академик Борис Петров") изучение подобного рельефа было продолжено с целью уточнения района их развития, морфологии и динамики.

Ключевые слова: Арктика, Печорское море, геоморфология, рельеф, песчаные волны, придонные течения, батиметрия, приливо-отливные течения

DOI: 10.31857/S0030157425020104, EDN: DYWPED

1. ВВЕДЕНИЕ

В 2018-2019 гг. сотрудниками ИО РАН проводились экспедиционные исследования в морях Северного Ледовитого океана. При этом некоторые работы проходили в проливе между мысом Канин и о. Колгуев Печорского моря (рис. 1). На галсах, выполненных с использованием многолучевого эхолота, на отдельных участках морского дна были выявлены многочисленные аккумулятивные элементы рельефа различной морфологической выраженности, представленные валообразными пологими выступами дна средней величины (до 4-6 м высотой и шириной в основании 15-30 м), квалифицированные авторами как осадочные (по другой терминологии – песчаные) волны, созданными гидрофизическими процессами – придонными или приливно-отливными течениями [5].

В соответствии с цифровой картой распространения типов грунтов в Баренцевом море, приведенной в работе [6], а также согласно данным, полученным в экспедициях 2018—2019 гг., песчаные волны в исследуемой акватории сложены среднеи 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.

Подобные формы рельефа широко распространены в различных морях Мирового океана на мелководном песчаном дне [4, 7, 9 и др.]. Обзор, охватывающий большое количество исследований по данной теме и их сравнительный анализ, представлен в работе [1]. Из него следует, что многие из "песчаных волн" (но не все) связаны с действием приливов и отливов, при этом они могут быть как симметричными, так и асимметричными в зависимости от действующих приливоотливных течений. Размеры этих форм рельефа предположительно определяются амплитудой прилива, асимметрия особенно характерна для высоких скоростей приливо-отливных течений. Однако многие примеры показывают, что в различных приливных обстановках особенности строения определяются сложным соотношением проявления течений, приливов и отливов при наличии того или иного количества, состава и зернистости осадочного материала.

Нет единой классификации волновых форм рельефа [2, 3 и др.]. В различное время исследователи этих процессов предлагали варианты классификации, исходя из имеющихся у них



Рис. 1. Карта района исследований: *1* – галсы, выполненные в 2022 г.; *2* – выделенные участки на галсах; *3* – дополнительный исследовательский полигон; *4* – галсы, выполненные в 2018–2019 гг.; *5* – участки галсов 2018–2019 гг., на которых наблюдались волновые формы дна. На врезке отмечен прямоугольником общий район исследований и стрелками показаны направления течений: сплошные линии – атлантические воды – ответвление южной ветви Нордкапского течения; пунктирные – местные течения.

данных и условий для конкретного района исследований. Фактором классификации являлись геометрические параметры "волн", размеры зерен, процессы волнообразования. В большинстве случаев основным критерием служили размеры волновых форм. При этом в большинстве работ выделяют основные формы — гряды и песчаные волны, рифели (по степени убывания размеров).

Волновые формы относительно стабильны в период квадратурного прилива, в период сизигийного прилива (при более высоких амплитудах) положение гребня меняется с последующими приливами и отливами. Размыв на менее крутом склоне (вверх по нему) отмечается в течение доминирующего отлива. Это, вместе с увеличением отложения наносов на этом склоне, обусловливает продвижение гребня. При этом если мелкие рифельные формы реагируют на гидродинамический режим каждой фазы приливо-отливного цикла, то крупные песчаные волны длительное время сохраняют свою ориентировку. Процессы, определяющие формирование и динамику песчаных волн, до сих пор не раскрыты в достаточной степени, что привело к проведению с 2004 г. периодических международных конференций MARID (Marine Sand Wave and River Dune Dynamics). На проводимой в 2023 г. MARID VII [8], не смотря на возрастающий объем работ по моделированию этих явлений, существенное внимание уделялось выявлению и картированию волновых форм рельефа дна. Актуальность таких исследований сохраняется.

В 51-м рейсе НИС "Академик Борис Петров" (2022 г.) экспедиционные работы в районе (рис. 1) были продолжены с целью расширения площади исследуемой акватории, определения области распространения волнообразных форм рельефа дна, уточнения пространственного положения и ориентации песчаных гряд и их связи с предполагаемыми придонными течениями. Схема галсов, выполненных в экспедиции 2022 г., приведена на рис. 1. Гидрологический режим этой части Печорского моря определяется преимущественно прибрежными стоковыми Беломорским и Печорским течениями, в меньшей степени — Канинско-Печорским ответвлением Мурманского течения теплых и соленых вод атлантического происхождения. По данным измерений на меридиональном разрезе по 50° в. д. в Поморском проливе скорости поверхностных течений составляют около 4 см/с, а придонных — меньше 1 см/с [10].

2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из основных видов песчаных волн, изучавшихся в 51-м рейсе НИС "Академик Борис Петров" в 2022 г., являлись асимметричные песчаные волны, противоположные склоны которых имеют разную крутизну и соответственно длину. Характерной особенностью таких песчаных волн является, во многих случаях, корреляция между крутизной их склонов и вектором преобладающего направления придонных течений, складывающимся из стационарного придонного течения и равнодействующей приливного и отливного движения водных масс в придонной области. Вектор течений направлен вдоль пологого склона песчаной волны в сторону гребня.

НИС "Академик Борис Петров" был оборудован штатным судовым многолучевым эхолотом SeaBat T-50ER, использовавшимся по всему маршруту движения судна. Батиметрическая съемка выполнялась в непрерывном режиме при скорости движения судна около девяти узлов. Сбор, обработка данных и построение цифровых моделей рельефа выполнены в программном пакете PDS V4.4.3.1. Работы проводились на ряде региональных профилей, расположенных так, чтобы перекрыть район исследования в предыдущих экспедициях и, по возможности, оконтурить всю акваторию, где, предположительно, имели место интересующие нас аккумулятивные подводные формы рельефа. Подготовка данных для построения карт и разрезов осуществлялась в геоинформационной системе (ГИС) Global Mapper. Построение разрезов и итоговых карт выполнено в программе Surfer (Golden Software)

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТ

В процессе проведения экспедиционных работ в 2022 г. было выполнено 13 региональных галсов общей протяженностью около 480 км и закартирован исследовательский полигон площадью порядка 20 км² (на рис. 1 галсы и полигон показаны красными линиями).

Практически на всех исследуемых профилях нами выделены различные типы аккумулятивных форм донного рельефа. По результатам проведенных работ на каждом из галсов определялась область распространения подобного рода волновых форм и выделялись несколько (обычно 2-3) фрагментов с наиболее характерными асимметричными песчаными волнами. Кроме того, в месте наиболее яркого проявления песчаных волн были выполнены дополнительные параллельные галсы на расстояниях друга от друга, обеспечивающих сплошное перекрытие дна. В результате была построена "мозаика" дна размерами порядка 2 × 12 км², позволившая уточнить форму, размеры и ориентацию подводных донных форм.

Наиболее характерные профили дна вдоль проведенных в экспедиции 2022 г. региональных галсов, а также выделенные фрагменты на галсах для дальнейшей детализации приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что формы рельефа, которые могут быть интерпретированы как волновые, расположены главным образом в западной части исследуемого полигона. Восточнее меридиана 48° в.д. (правая часть галса 3-4, галсы 5-4 и 6-5) они практически отсутствуют. С большой долей вероятности это может быть объяснено наличием ярко выраженного поднятия дна, отделяющего исследуемую акваторию от входа в Поморский пролив, которое препятствует распространению формирующих песчаные волны придонных течений в восточном направлении.

На рис. 3 в качестве примеров приведены выделенные и указанные на рис. 2 фрагменты профилей дна вдоль некоторых галсов. Наряду с интересующими нас песчаными волнами, характерный вид которых представлен, например, на участках 2₁₋₂, 1₂₋₃, 3₉₋₈, 1₁₀₋₉, были выделены обширные поля сплошного развития специфических форм микрорельефа - песчаных рифелей высотой до 1 м при ширине основания около 50-60 м (участки 1₁₋₂, 1₃₋₄). Протяженность участков сплошного развития рифелей достигала 10 км. Полученные результаты показали, что зона распространения песчаных волн с восточной стороны полигона резко ограничивается линией уменьшения глубины акватории при входе в Поморский пролив, и позволяют предположить, что в придонной области Поморского пролива между п-вом Канин и о. Колгуев преобладает результирующее течение северо-западного направления.

Следует отметить, что выявление реальной формы регулярных протяженных песчаных волн при использовании обычных судовых

ДМИТРИЕВСКИЙ и др.



Рис. 2. Профили дна с проявлением волнообразных форм вдоль галсов (нумерация в соответствии с рис. 1, прямоугольниками показаны фрагменты детализации, приведенные на рис. 3).

однолучевых эхолотов возможно только при прохождении судна в направлении, перпендикулярном характерному направлению их простирания. Таким образом, не имея априорной информации о пространственной ориентации хребтов песчаных волн при прохождении судна, например вдоль фронта песчаных волн, мы не только не получаем информацию о форме песчаных волн, но и можем не заметить их наличия.

Ситуация существенно изменяется при использовании многолучевых эхолотных систем. Ширина полосы захвата многолучевого эхолота при одиночном проходе и глубинах исследуемой акватории порядка 60 м составляла в данном случае около 200 м, что много раз позволяло визуально оценить пространственную ориентацию волновых форм дна исходя из данных только одного прохода судна и внести соответствующие коррективы в направления следующих галсов.

Методически более правильным при исследовании подобного рода форм дна является движение судна по сетке параллельных галсов, расположенных друг от друга на расстоянии, обеспечивающем сплошное перекрытие дна многолучевым эхолотом, и последующее построение "мозаики" исследуемого участка дна, что дает исчерпывающую информацию о форме и пространственной ориентации исследуемых песчаных волн. Однако такие работы требуют значительного расхода судового времени и могут быть рекомендованы только на ограниченных, представляющих особый интерес участках акватории. С учетом сказанного, на рис. 4 приведено мозаичное изображение дополнительного полигона,

ВОЛНОВЫЕ ФОРМЫ РЕЛЬЕФА ДНА ПЕЧОРСКОГО МОРЯ...



Рис. 3. Детализированные фрагменты профилей (нумерация в соответствии с рис. 2).

построенное по результатам 10 параллельных галсов судна, расположенных на расстоянии 200 м друг от друга. Район полигона (рис. 1) был выбран таким образом, что он западной стороной захватывал область активного распространения песчаных волн, а восточной выходил на границу резкого уменьшения глубины при входе в Поморский пролив.

Кроме того, на рисунке приведены изображения трех одиночных галсов судна, расположенных к северу и югу от полигона и позволяющих оценить направление распространения песчаных волн, используя данные только одного прохода судна. Основным преимуществом построенного мозаичного изображения является тот факт, что, используя его данные, программным способом (без реального прохождения судна) могут быть построены профили дна вдоль любого желательного направления и таким образом оптимально оценены геометрические параметры исследуемых песчаных волн. На рис. 4 красными линиями обозначены три профиля дна, построенные по полученной цифровой модели рельефа дна в перпендикулярных к направлениям хребтов песчаных волн направлениях. Может быть оценена очевидная разница между разрезом П1 – П1а на рис. 5,



Рис. 4. Мозаичное изображение выделенного на рис. 2 дополнительного полигона.



Рис. 5. Выделенные глубинные разрезы на дополнительном полигоне. Нумерация соответствует рис. 4.

расположенном перпендикулярно фронту песчаных волн и показывающем их реальную форму, и профилем l_{13-14} на рис. 2, частично проходящем через тот же район, но на котором форма песчаных волн практически не видна за счет неудачно выбранного первоначального направления.

На рис. 6 с некоторой степенью достоверности оконтурен участок исследуемой акватории, на котором были обнаружены песчаные волны. На рис. 6 нанесены экспериментально полученные направления гребней песчаных волн. В рамках гипотезы о том, что при образовании асимметричных аккумулятивных форм главную роль в их образовании играют стационарные придонные течения, и при этом направления гребней волн перпендикулярны преобладающему вектору течений, построена предполагаемая схема придонных стационарных течений



Рис. 6. Карта исследуемой акватории с предполагаемыми направлениями придонных течений: *1* – предполагаемые направления придонных течений; *2* – выявленные направления хребтов песчаных волн; *3* – граница участка ассиметричных песчаных волн.

в глубоководной части пролива между п-вом Канин Нос и о. Колгуев.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 51-м рейсе НИС "Академик Борис Петров" (2022 г.) в проливе между п-вом Канин и о. Колгуев было выполнено картирование морского дна в районе, где ранее в экспедициях 2018-2019 гг. было обнаружено поле осадочных песчаных волн, представляющих собой серии аккумулятивных образований разной морфологической выраженности. Типизация выделенных форм в задачи данной работы не входила. Обращая особое внимание на поля асимметричных осадочных волн, происхождение которых, по мнению многих исследователей, связано с наличием стационарных придонных течений, авторами проведена оценка пространственного положения данных форм на площади порядка 10000 км². На основании оценки форм аккумулятивных образований и пространственной ориентации их осей (гребней) сделана попытка оценки преобладающих направлений придонных течений в указанной акватории. При малом количестве первичных данных о скоростях придонных течений (средние, сезонные и др.) указанная информация представляет очевидный интерес.

Песчаные волны являются активными морфодинамическими элементами, которые как отражают, так и влияют на гидродинамические и седиментационные процессы в различных пространственно-временных масштабах. Для понимания динамики гребней песчаных волн целесообразна повторная съемка на полигоне, показанном на рис. 4.

В целом, полученная информация может оказаться полезной при оценке придонных процессов и возникающих при этом геологогеоморфологических рисков, что окажется весьма актуальным при активизации научно-исследовательских и инженерно-прикладных работ вдоль трассы Северного морского пути.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству экспедиции и экипажу НИС

"Академик Борис Петров" за помощь в проведении работ.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИО РАН № FMWE-2024-0019.

Конфликт интересов Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Долотов Ю.С. Процессы рельефообразования и осадконакопления на приливных побережьях мирового океана. М.: Научный мир, 2010. 180 с.
- 2. Знаменская Н.С. Донные наносы и русловые процессы. Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 191 с.
- 3. Левченко О.В., Щербаков Ф.А. Приливно-отливные формы мезорельефа и структура донных осадков восточной части Белого моря (по данным высокоразрешающей сейсмоакустики) // Докл. РАН, серия геология. 2000. Т. 372. № 6. С. 796–800.
- 4. *Лонгинов В.В.* Очерки литодинамики океанов. М.: Наука, 1973. 243 с.

- 5. Никифоров С.Л., Ананьев Р.А., Дмитревский Н.Н. и др. Осадочные волны юго-восточного шельфа Баренцева моря (п-ов Канин – Чешская губа) // Океанология. 2023. Т. 63. № 4. С. 585–591.
- 6. *Новиков М.А.* Применение цифровой модели донных отложений Баренцева моря для анализа загрязнения // Вестник КНЦ РАН. 2018. № 10. С. 204–208.
- Путанс В.А. Осадочные волны: современное состояние знаний // Бюл. МОИП. Отд. Геол. 2012. Т. 87. Вып.1. С. 25–37.
- Marine and River Dune Dynamics MARID VII, 3–5 April 2023, Rennes, France.
- 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. P. 53–80.
- E.U. Copernicus Marine Service Information, Global Ocean Physics Reanalysis. URL: https://resources.marine.copernicus.eu/productdetail/GLOBAL_ REANALYSIS_PHY_001_030 (дата обращения 15.07.2023).

WAVE FORMS OF THE PECHORA SEA BOTTOM RELIEF IN THE STRAIT BETWEEN THE KANIN PENINSULA AND KOLGUYEV ISLAND

N. N. Dmitrevsky^{a, *}, N. V. Libina^{a, **}, E. A. Sukhikh^b

^a Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^b Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia *e-mail: nnd2008@rambler.ru **e-mail: lnatvit@mail.ru

During the expeditions of the Institute of Oceanology of the 38th and 41st voyages of the RAS R/V "*Akade-mik Nikolai Strakhov*" (2018–2019) in the Pechora Sea between the Kanin Peninsula and Kolguyev Island. Kolguyev revealed a large number of accumulative sandy bottom landforms and characterized a number of their parameters. In 2022 (51st cruise of the R/V "*Akademik Boris Petrov*"), the study of such relief was continued in order to clarify the area of their development, morphology and dynamics.

Keywords: Arctic, Barents Sea, geomorphology, natural risks, sand waves, bottom currents, bathymetry, tidal currents