

УДК 551.462(268.55)

МОРФОЛОГИЯ И ГЕНЕЗИС ПОДВОДНЫХ ВАЛОВ И ГРЯД ВОСТОЧНО-СИБИРСКОГО МОРЯ[#]

© 2023 г. А. Ю. Сергеев^{1,*}, Д. В. Рябчук¹, В. А. Жамойда¹, Л. М. Буданов¹, О. А. Ковалева¹,
И. А. Неевин¹, М. Ю. Токарев^{2,**}, Л. Д. Баширова^{3,***}, Е. П. Пономаренко³

¹ФГБУ “ВСЕГЕИ”, Санкт-Петербург, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, Москва, Россия

³Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*E-mail: sergeevau@yandex.ru

**E-mail: mjtokarev@gmail.com

***E-mail: bas_leila@mail.ru

Поступила в редакцию 04.07.2022 г.

После доработки 17.10.2022 г.

Принята к публикации 14.03.2023 г.

Прибрежно-шельфовая зона Восточно-Сибирского моря относится к одному из наименее изученных районов морей Российской Арктики. Одной из важных нерешенных проблем является возможное существование покровного ледника в районе Новосибирских островов и связанный с ней вопрос о возрасте и генезисе подводных гряд по периферии архипелага. По результатам комплексного анализа геолого-геофизических данных, полученных в ходе экспедиционных работ ФГБУ “ВСЕГЕИ” в 2018 и 2020 г., и комплекса лабораторных исследований выделены два принципиально различных по морфологии, составу, возрасту и генезису типа подводных гряд и валов. Гряды первого типа, на периферии подводной долины р. пра-Колымы и вокруг о-ва Новая Сибирь, асимметричны, имеют относительную высоту от 1 до 6 м, ширину от 1.5 до 14 км, (в среднем — 4.5 км) и протяженность от 6 до 202 км (в среднем — 37 км). Они сложены очень плотными глинами и глинистыми алевритами без примеси грубообломочного материала; возраст отложений 18–13 тыс. кал. л. В межгрядовых ложбинах обнажаются отложения среднего и позднего неоплейстоцена. Состав, морфология и возраст позволяют предположить денудационный генезис гряд, однако механизм их формирования не очевиден. Ко второму типу относится система прибрежных гряд, расположенных на расстоянии до 30 км от о-ва Новая Сибирь, которые сложены мелкозернистыми, хорошо сортированными песками. Ширина гряд варьирует от 1 до 2 км, высота — от 4 до 8 м, протяженность — 10–15 км. Они имеют слабо асимметричную форму, склон со стороны острова более пологий. Эта система гряд формировалась за счет прибрежно-морских аккумулятивных процессов в голоцене. Конечно-моренные гряды на исследованных участках дна не выявлены, что не подтверждает гипотезу распространения покровного оледенения неоплейстоцена в пределы шельфа.

Ключевые слова: рельеф морского дна, Арктика, шельф, сейсмоакустическое профилирование, голоцен, неоплейстоцен

DOI: 10.31857/S294917892303009X, **EDN:** WDUFPE

ВВЕДЕНИЕ

Прибрежные районы Восточно-Сибирского моря (между Новосибирскими о-вами и о-вом Врангеля) относятся к наименее изученным акваториям Российской Арктики. Отбор проб поверхностных осадков в пределах рассматриваемой площади выполнялся экспедициями НИИГА–ВНИИОке-

ангеология с 1934 г. по конец 1980-х гг. (Семенов, 1965; Яшин, 2000 и др.). Исследования минерального состава донных отложений и закономерностей осадконакопления осуществлялись ДВО РАН (Дударев и др., 2007; Николаева и др., 2013 и др.) и ИО РАН им. П.П. Ширшова (Мирошников и др., 2020). В мелководной части акватории Восточно-Сибирского моря АО “Морская арктическая геологоразведочная экспедиция”, ОАО “Дальморнефтегеофизика” и Геологической службой Германии (BGR) проводилось сейсмическое профилирование; в пределах исследуемого района общая протяженность профилей составила 9590 км

[#] Ссылка для цитирования: Сергеев А.Ю., Рябчук Д.В., Жамойда В.А. и др. (2023). Морфология и генезис подводных валов и гряд Восточно-Сибирского моря // Геоморфология и палеогеография. Т. 54. № 3. С. 26–38. <https://doi.org/10.31857/S294917892303009X>; <https://elibrary.ru/WDUFPE>

(Петровская, Савишкина, 2014; Рекант и др., 2020). Однако работы методом непрерывного сейсмоакустического профилирования (НСАП), позволяющие получать детализированную информацию о верхней части геологического разреза, гидролокация бокового обзора (ГЛБО), а также колонковый проботбор и вибробурение до начала экспедиционных работ ВСЕГЕИ в 2018 г. были выполнены здесь в крайне ограниченном объеме — при геологической съемке Колымского залива и на профиле 5-АР к западу от о-ва Врангеля (Сакулина и др., 2011). Детальное изучение и датирование отложений на исследуемой площади ранее не осуществлялись.

Подводный склон, примыкающий к Новосибирским островам и Колымской низменности, до глубины 30 м осложнен системой узких подводных поднятий относительной высотой 5–10 м. Они были установлены по данным анализа батиметрических карт камеральным путем С.Л. Никифоровым и описаны им впервые в 1985 г. как вдольбереговые бары (Никифоров, 1985; 1989). В настоящее время гипотезы об их генезисе и возрасте крайне противоречивы. Траектовка происхождения этих форм рельефа в качестве конечно-моренных гряд является одним из аргументов в пользу существования в среднем неоплейстоцене покровного оледенения Новосибирских островов (Басилян, Никольский, 2007). Впервые полученные в ходе данного исследования материалы разночастотного НСАП, ГЛБО, многолучевого эхолотирования (МЭ) и колонкового проботбора (с последующим комплексом аналитических исследований) позволили существенно продвинуться в понимании этой проблемы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для создания наиболее точной батиметрической модели рельефа (БМР) морского дна были оцифрованы морские навигационные карты “Управления навигации и океанографии Министерства обороны Российской Федерации” масштаба 1:500000 и 1:200000 с сетью промеров глубин на всей исследованной площади (рис. 1). ГИС-анализ этой модели позволил выделить и проследить системы положительных линейных форм рельефа и заложить геофизические профили с целью их детального изучения.

В 2018 и 2020 г. в Восточно-Сибирском море ВСЕГЕИ проведены геолого-геофизические работы в рамках Государственного геологического картирования м-ба 1:1000000 (листы R-57-60; S-55,56) (Жамойда и др., 2020). Работы выполнялись с судов “Иван Киреев” (2018 г.) и “Капитан Воронин” (2020 г.). Общий объем разночастотного профилирования НСАП составил 3400 км, ГЛБО и многолучевого эхолотирования — 3100 км. Отобраны пробы поверхностных осадков и вы-

полнена подводная видеосъемка на 190 станциях. Получены керны донных отложений с 29 станций; длина колонок составила от 30 см до 1.9 м (рис. 1).

Отбор образцов поверхностных осадков осуществлялся с помощью бокс-корера, кернов донных отложений — при помощи прямоточных ударных гравитационных трубок. Подводная видеосъемка велась телевизионной установкой AC-ROV 100 (Шотландия). Для всех кернов проведены описание, фотографирование, измерения сопротивления недренированному сдвигу¹ (прочность на сдвиг) с помощью портативного пенетрометра, геохимические исследования, в том числе, определение содержания Вг для расчета палеосолёности по методике А.Г. Григорьева (Григорьев и др., 2009) и гранулометрический анализ (каждый 1 см керна); содержание органического вещества определено в лаборатории Атлантического Отделения ИО РАН им П.П. Ширшова. Для нескольких кернов выполнены микрофаунистический (фораминиферовый), палинологический и диатомовый анализы. Впервые для района исследований в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” ИГРАН и Центре прикладных изотопных исследований Университета Джорджии (США) было проведено радиоуглеродное датирование 14 образцов четвертичных отложений. Для калибровки возраста использовалась программа Calib REV8.20 (<http://calib.org/calib/calib.html>; Reimer et al., 2020). Проведенные исследования позволили выполнить расчленение верхней части геологического разреза с выделением сейсмолещ и получением информации о слагающих их отложениях (Жамойда и др., 2020).

В ходе исследований, в частности, получены сейсмоакустические разрезы через подводные гряды, проведен интерпретационный отбор грунтовых колонок с вершин гряд и из межгрядовых ложбин.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Окраинное шельфовое Восточно-Сибирское море имеет малые глубины и уклон дна. В районе островов Жохова и Вилькицкого расположена обширная аккумулятивная равнина, изобата 20 м проходит на расстоянии 200–400 км от материка. Только на востоке у м. Большой Баранов, в районе Шелагского хребта, а также у западного побережья о-ва Врангеля, она удалена не более чем на 2 км. Подводная равнина расчленена депрессиями проливов Санникова, Этерикан и Дмитрия

¹ Максимальное касательное напряжение при нагружении грунта в условиях отсутствия дренирования.

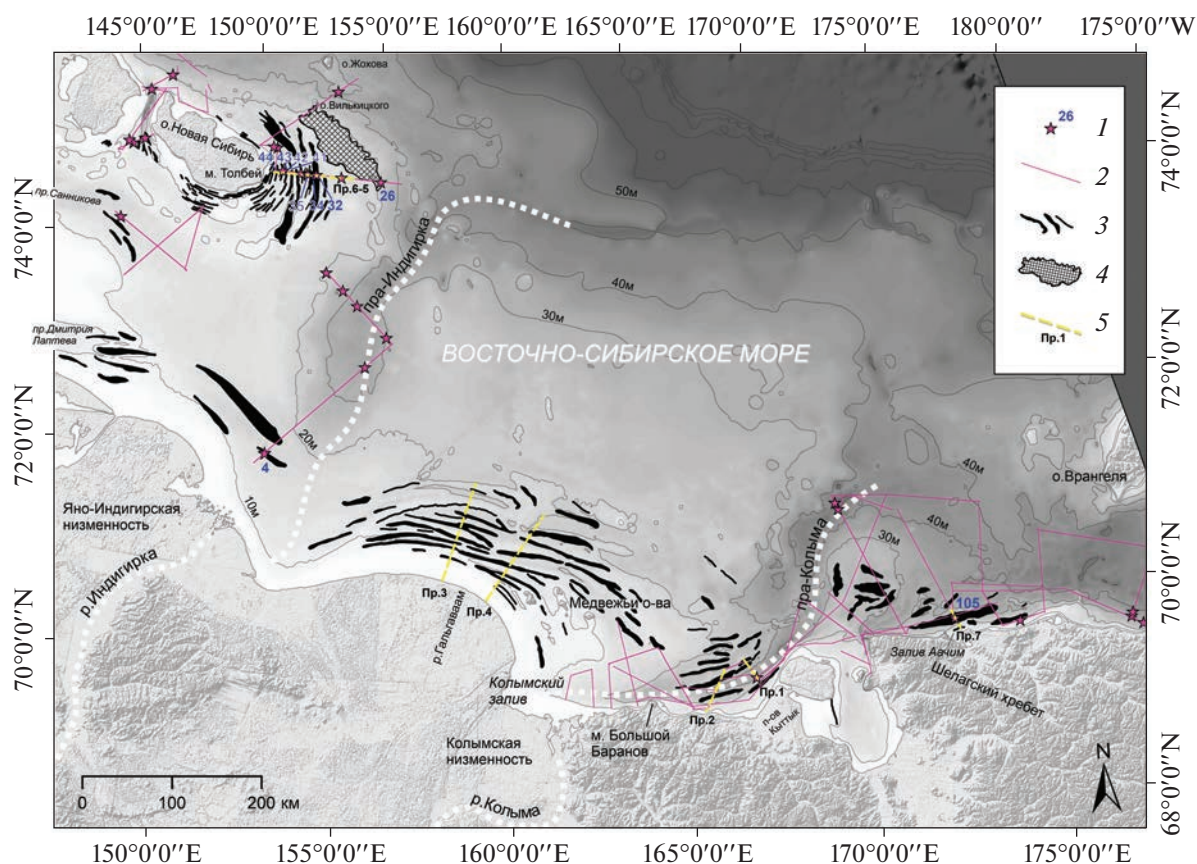


Рис. 1. Карта района исследований: 1 – станции колонкового пробобора 20VSM и их номер; 2 – совмещенные профили высокочастотного НСАП, ГЛБО и многолучевого эхолотирования ВСЕГЕИ 2018 и 2020 г.; 3 – гряды; 4 – холмисто-грядовый рельеф; 5 – участки подводного берегового склона, для которых показаны профили на рис. 2 (профили 3 и 4 построены по данным с батиметрической карты).

Fig. 1. Map of the investigation area: 1 – stations of the core sampling (20VSM) and their numbers; 2 – combined profiles of the side-scan, seismic sub-bottom profiling and multibeam echo-sounder survey executed by VSEGEI in 2018 and 2020 years; 3 – bars; 4 – hilly ridge relief; 5 – areas of the underwater coastal slope with profiles represented in fig. 2 (sections 3 and 4 were constructed according to data from the bathymetric map).

Лаптева, а также палеодолинами рек Индигирки и Колымы (рис. 1).

Климатические условия Восточно-Сибирского моря определяются положением в высоких широтах, близостью континента и свободным сообщением с Центральным арктическим бассейном. Климат района морской арктический, с суровой и малоснежной зимой продолжительностью около 9 мес. В сезон гидродинамической активности морей (август-сентябрь) барический градиент (градиент атмосферного давления)² над акваторией в целом направлен с севера на юг (Григорьев и др., 2006). Волнение относительно слабое, главным образом вследствие значительной ледовитости. На западе максимальная высота волн может достигать 4 м, на востоке не превышает 1.5–2 м

² Изменение атмосферного давления на единицу расстояния по нормали к поверхности равного давления (изобарической поверхности) в сторону убывания давления.

(Павлидис, Леонтьев, 2000). Постоянные течения имеют слабо выраженную циклоническую циркуляцию. Они часто нарушаются ветровыми, которые нередко бывают сильнее постоянных. Влияние приливных течений относительно невелико (Добровольский, Залогин, 1982).

Дочетвертичные образования рассматриваемой части Восточно-Сибирского моря представлены отложениями раннего и среднего палеозоя, деформированными в элсмирскую орогению; терригенными породами позднего палеозоя – ранней юры, интенсивно деформированными на этапе чукотской (позднекимерийской) орогении; слабодеформированными вулканогенно-осадочными породами поздней юры – раннего мела и пологозалегающими осадочными породами позднего мела и неогена (Рекант и др., 2020). Тектоническая активизация в раннемеловое время ознаменовалась излиянием лав и внедрением интрузий. Докайнозойский этап завершился эпо-

Таблица 1. Результаты AMS датирования донных отложений Восточно-Сибирского моря
Table 1. AMS dating of the bottom sediments of the East-Siberian Sea

Образец	Лаб. номер IGAN _{AMS}	Интервал колонки, см	Материал	Радиоуглеродный возраст, л. н.	Калиброванный возраст, кал. л. н.: (1 σ)/среднее
18ВСМ-105	7557	48–49	POB	5360 $\pm$ 20	5601–5543/5560
20ВСМ-4	8974	20–30	POB	12780 $\pm$ 35	15173–15300/15240
20ВСМ-26	8978	124–126	POB	11610 $\pm$ 30	13448–13503/13476
20ВСМ-32	8979	36–38	POB	12970 $\pm$ 35	15438–15617/15521
20ВСМ-35	8980	10–12	POB	15325 $\pm$ 50	18639–18748/18665

хой пенеппенизации, наступившей, вероятно, в начале палеогена, за время которой в условиях влажного субтропического климата могли образоваться слаборасчлененный холмистый рельеф и кора выветривания (Бартова, 2021). Дно также полностью покрыто чехлом рыхлых плиоцен-четвертичных отложений, мощность которых в палеодолинах достигает 150 м (Жамойда и др., 2020).

РЕЗУЛЬТАТЫ

По результатам анализа батиметрической модели рельефа в исследуемом районе были выделены гряды, ставшие основными объектами данного исследования. Гряды распространены в нескольких районах.

Первый район, представляющий интерес, расположен на обрамлении субширотной ориентированной подводной долины пра-Колымы, ширина которой составляет 16–25 км. К востоку от мыса Большой Баранов долина разделяется на несколько рукавов. Выделяются узкие депрессии, разделенные пологими симметричными грядами относительной высотой 4–5 м и шириной 5–7 км (рис. 2, а)).

Второй район с многочисленными грядами высотой 3–5 м и шириной 6–10 км расположен к северу и северо-западу от Медвежьих островов, где они прослеживаются на глубинах от 5–7 м до 20 м (рис. 2, б)). Ближе к берегу гряды более выдержаны по простиранию, достигая в длину 100–200 км. Мористее их протяженность сокращается до 50–80 км.

К западу от палеодолины р. Индигирки вдоль берега развиты аналогичные формы рельефа, для которых удалось получить сейсмоакустический разрез и датировать образцы донных отложений (станция 20ВСМ-4), представленных тугопластичными глинами. Протяженность гряд достигает 100 км при ширине в первые десятки километров и относительном превышении 1–2 м. По результатам AMS датирования возраст отложений составляет 15.2 тыс. кал. л. (табл. 1).

Наиболее детально удалось исследовать грядовую равнину, занимающую обширную площадь

по периферии о-ва Новая Сибирь (рис. 2, в, г)). Сейсмоакустическое профилирование было выполнено по профилям вкрест простирания гряд и заверено донным пробоотбором (станции 20ВСМ-41, 20ВСМ-32, 20ВСМ-34, 20ВСМ-35 на рис. 2, в); станции 20ВСМ-42, 20ВСМ-43, 20ВСМ-44 на рис. 2, г)). Ранее по данным анализа рельефа дна эти гряды, расположенные субпараллельно береговой линии о-ва Новая Сибирь, рассматривались как единая система (Никифоров, 1989; Басилян, Никольский, 2007), однако выполненные нами исследования показали, что по морфологии и составу отложений выделяются два принципиально различных типа этих образований.

Гряды, расположенные на прибрежных мелководьях о-ва Новая Сибирь (глубины моря – 10–20 м; расстояние от берега менее 30 км), имеют слабо асимметричную форму с более пологим склоном со стороны острова и более крутым мористым склоном. Протяженность гряд составляет 10–15 км, ширина – 1–2 км, высота – 4–8 м (рис. 2, г)). Акустическая структура транспарентная (акустически прозрачная, без видимых внутренних отражений), слоистость внутри гряды не просматривается. Гряды сложены хорошо сортированными (So 1.04–1.10) мелкозернистыми (вес модальной фракции 0.1–0.25 мм составляет 92–93%) буроватыми песками (рис. 3). Грубообломочный материал отсутствует, содержание частиц 0.1–0.01 мм составляет 3–5%, а <0.01 мм – не превышает 0.5%. В связи с отсутствием достаточного количества органического вещества радиоуглеродное датирование не проводилось. Стратиграфически гряды относятся к наиболее молодым образованиям (голоцен).

Гряды на внешней периферии морской равнины (глубины моря – 20–30 м; расстояние от берега – 30–85 км) имеют иную морфологию и состав. Они резко асимметричны, причем пологий склон ориентирован в сторону моря, а крутой – в сторону берега (рис. 2, в)). Средняя протяженность гряд – 25–30 км при ширине в среднем 2–4 км и относительной высоте – 4–6 м.

По данным сейсмоакустического профилирования гряды сложены слоистыми отложениями, в

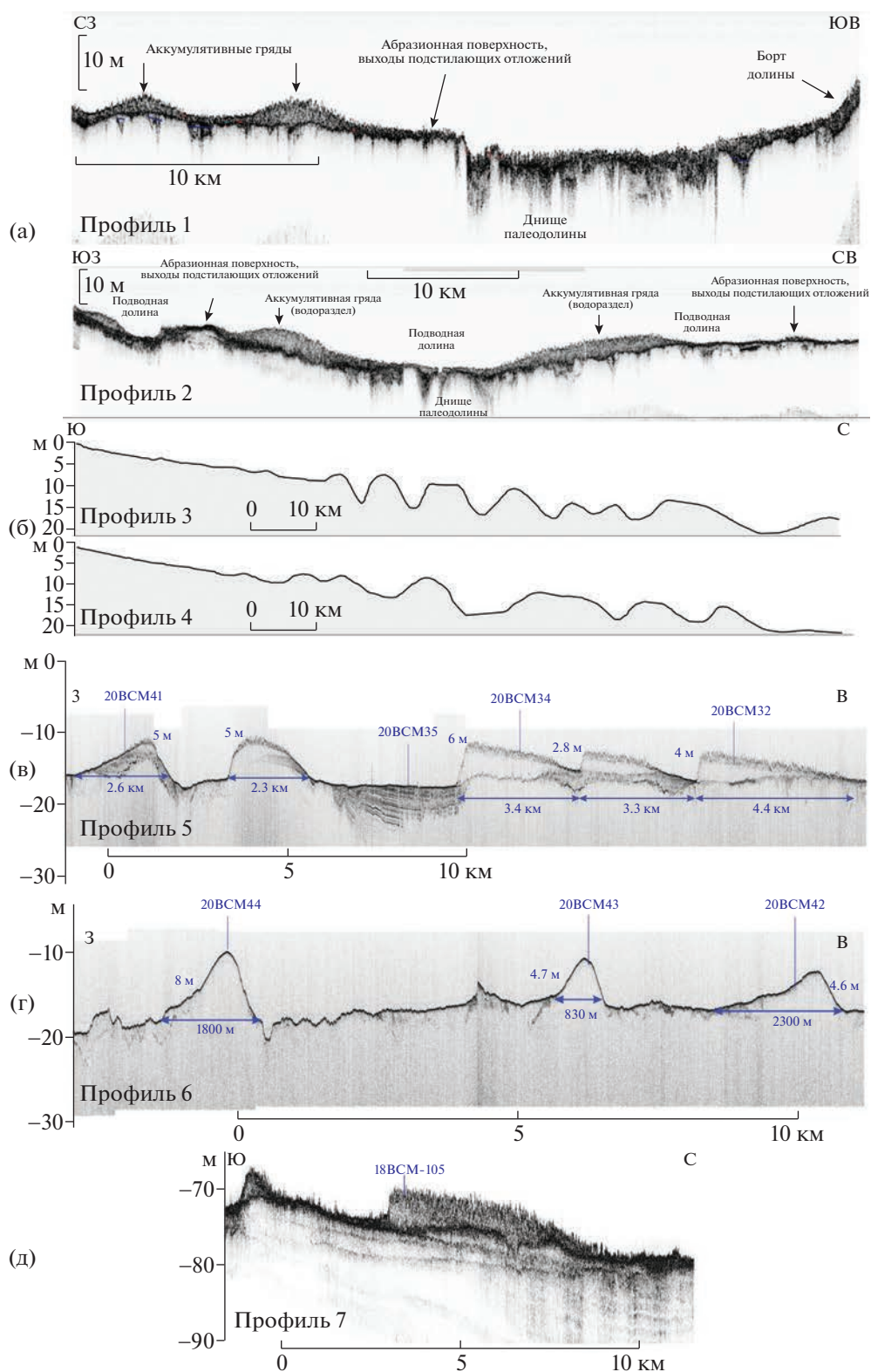


Рис. 2. Профили рельефа морского дна поперек подводных гряд по данным высокочастотного НСАП (профилограф). (а, д) – EdgeTech, модель CHIRP 3300НМ; (в, г) – Innomar SES 2000-Light) и по данным батиметрии (б). Синим цветом показаны станции донного пробоотбора и их номера (только на профилях (в, г, д)). Положение и краткое описание профилей: (а) – напротив п-ова Кыттык, пересекает подводную палеодолину р. Колымы; гряды предположительно представлены глинами; (б) – вблизи устья р. Гальгаваам; (в) – на траверзе м. Толбей (о-в Новая Сибирь); три гряды в восточной части профиля сложены плотными глинистыми отложениями (станции пробоотбора 20ВСМ-32,

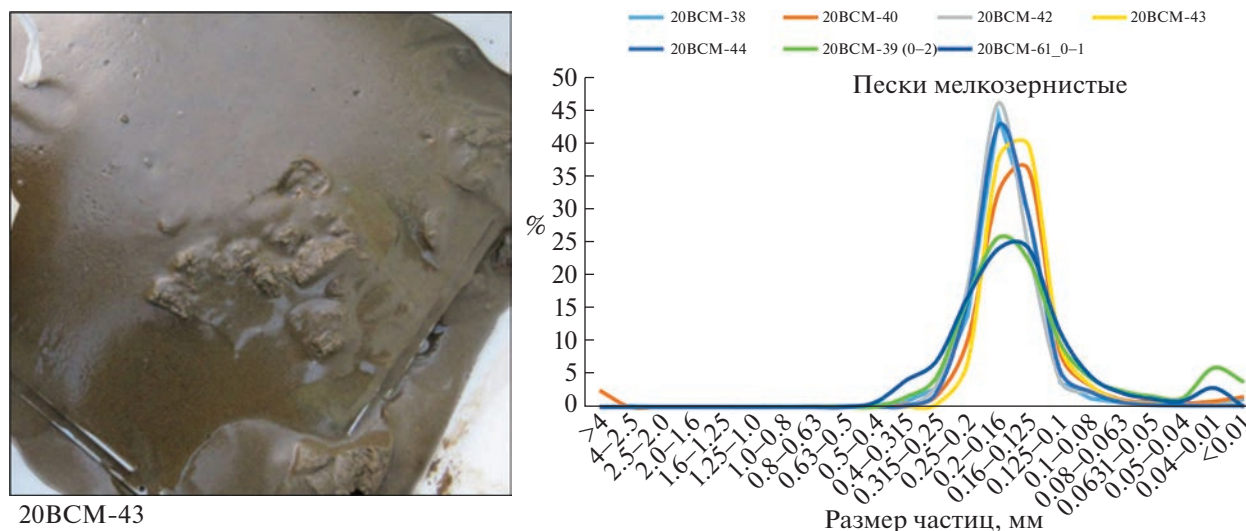


Рис. 3. Фото образца (20VSM-43) и кривые распределения гранулометрического состава отложений прибрежных гряд по периферии о-ва Новая Сибирь. Номера образцов показаны над графиком.

Fig. 3. Photo of sample (20VSM-43) and grain-size distribution curves of the deposits of near-shore ridges around New Siberia Island. Number of samples are under the graph.

ряде случаев в их основании прослеживается акустически выраженная поверхность нижележащего комплекса. По данным пробоотбора они представлены плотными (от мягкопластичной до твердой консистенции) глинами и алевроглинами от темно-серого до черного цвета, с неявной горизонтальной слоистостью. В колонке 20VSM-26 (рис. 4, (а)) содержание пелитовой и алевроитовой фракций варьирует в значительном диапазоне, образуя слои мощностью от 1 до 10 см. Среднее содержание пелитовой фракции составляет 50.6% (35.0–80.6%), алевроитовой – 44.5% (18.2–57.0%), песчаной – 4.8% (0.5–21.8%).

В колонке 20VSM-32 (рис. 2, (в), рис. 4) наблюдается чередование прослоев пелитовых алевроитов и алевроитовых пелитов (интервалы 0–13, 15–22, 26–31, 37–60 см (забой)) и пелитов (13–15, 22–26 и 31–36 см). При этом вес гранулометрических фракций варьирует в достаточно широких пределах: песок – в среднем 2.4% (0–6.4%), алевроит – 37.7% (8.0–58.8%), пелит – 59.9% (35.3–92.1%) (рис. 4, (б)). Содержание $C_{орг}$ в опи-

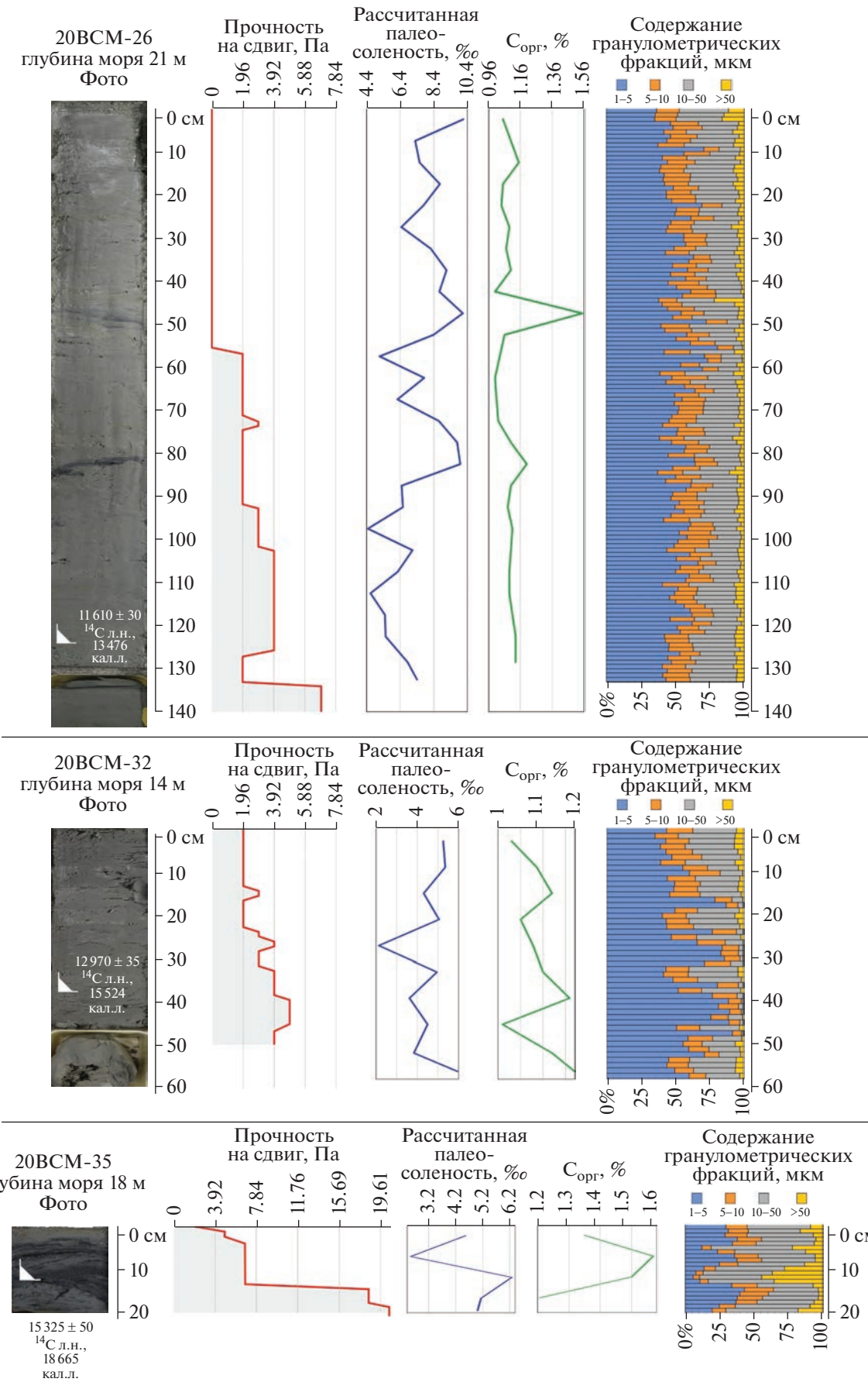
сываемых отложениях составляет в среднем – 1.1% (от 0.64 до 1.59%). Рассчитанная палеосоленость не превышает 10‰.

По данным датирования гряды сложены разновозрастными отложениями преимущественно конца позднего неоплейстоцена – 13.4–15.5 тыс. кал. л. (образцы 20VSM-26 – $IGAN_{AMS}$ 8978 и 20VSM-32 – $IGAN_{AMS}$ 8979).

В межгрядовых ложбинах обнажаются образования позднего неоплейстоцена – 18.6 тыс. кал. л. (образец 20VSM-35 – $IGAN_{AMS}$ 8980), как правило, представленные плотными, слоистыми глинистыми алевроитами (рис. 4, (в)). В качестве примера можно привести грунтовую колонку 20VSM-35, сложенную пелитовыми алевроитами (интервалы 0–5, 6–10 и 14–21 см) с прослоями песчаных алевроитов (интервалы 5–6 и 10–14 см). В пелитовых алевроитах среднее содержание песчаной фракции составляет 8.0% (2.7–17.8%), алевроитовой – 59.6% (52.4–66.2%), пелитовой – 32.4% (19.5–43.1%); в песчаных алевроитах содержание песчаной фракции – 33.2% (21.9–44.4%),

←
20VSM-34), гряда в западной части профиля сложена мелко-среднезенистыми песками (станция 20VSM-41); (г) – вблизи берега на траверсе м. Толбей (о-в Новая Сибирь), по данным пробоотбора гряды сложены песками (станции 20VSM-42, 20VSM-43, 20VSM-44); (д) – напротив залива Ачим, гряда по данным пробоотбора сложена глинами (станция 18VSM-105).

Fig. 2. Sections of the seabed across the submarine ridges and bars according to acoustic (high-frequency sub-bottom profiler). (а, д) – EdgeTech (модель CHIRP 3300HM); (в, г) – Innomar SES 2000-Light) and bathymetric data (б). Sampling stations are shown by blue color (only on profiles (в, г, д)). Location and description of profiles: (а) – near the Kyttyk Peninsula, across the underwater palaeovalley of the Kolyma River; (б) – near the mouth of the Galgavaam River; (в) – near Cape Tolbey (New Siberia Island); three submarine ridges in eastern part of the profile composed on dense clay (sampling sites 20VSM-32 and 20VSM-34), ridge in western part of profile – medium to fine grained sand (site 20VSM-41); (г) – near Cape Tolbey (New Siberia Island), according to sediment sampling, submarine ridges composed by sandy deposits (20VSM-42, 20VSM-43, 20VSM-44); (д) – near Aachim bay; submarine ridge according to sediment sampling composed on clay (sampling site 18VSM-105).



алевритовой — 57.0% (50.1–66.1%), пелитовой — 9.8% (5.5–13.6%).

Колонка 20ВСМ-4 вскрыла 37 см плотных сухих тугопластичных пелитовых алевритов. Среднее содержание песчаных частиц — 5.4% (2.9–8%), алевритовых — 59.8% (57.6–61.8%), пелитовых — 34.8% (30.5–39.5%). Содержание $C_{\text{орг}}$ варьирует от 0.6 до 1.16%, расчетная соленость — от 3.9‰ до 7.5‰, увеличиваясь вверх по разрезу.

Особенность рельефа практически всей площади исследований — высокая степень переработки дна ледовой экзарацией. На профилях высокочастотного НСАП поверхность отложений (в том числе, в зонах развития гряд второго типа) имеет “игольчатый” характер (рис. 2, а)). Профильные исследования с использованием ГЛБО и многолучевого эхолотирования, а также подводная видеосъемка показали, что на некоторых участках практически все дно нарушено бороздами выпаживания: в среднем 5–6 борозд на 1 км. Ширина их варьирует от первых метров до 100 м и более (рис. 5).

Глубина борозд по данным МЭ и высокочастотного НСАП достигает 3 м, хотя обычно не превышает 1.5 м. Некоторые борозды имеют “свежий” облик с хорошо выраженной обваловой. Иногда они практически занесены донными осадками. Экзарационные борозды наблюдаются до глубины 50 м. Чаше встречаются относительно широкие борозды или даже их серии, образуемые при перемещении торосов. Кроме того, встречаются множественные тонкие борозды (“царапины”) — результат воздействия на дно ледяной плотины³. Согласно данным С.А. Огородова, в Восточно-Сибирском море предельная глубина моря, где возможна современная экзарация дна морским льдом, достигает 40–60 м, а интенсивность этого процесса является наивысшей среди всех арктических морей России (Огородов, 2014). Однако нельзя исключать, что некоторые борозды, в частности, выявленные на больших глубинах, имеют голоценовый или даже позднелепистоценовый возраст. Важно отметить, что экзарационные борозды существенно меньше описанных выше гряд.

³ Ледяная плотина — протяженная гряда из достигающих дна торосов и набивного льда, образующаяся под напорным воздействием ледяных полей на кромку припая (Огородов, 2014).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Морфология, стратиграфическое и батиметрическое положение гряд на прибрежных мелководьях по периферии о-ва Новая Сибирь, а также состав и гранулометрические параметры слагающих их отложений позволяют достаточно уверенно определить их возраст и генезис. Полученные данные подтверждают гипотезу С.Л. Никифорова (1985, 1989) об аккумулятивном прибрежно-морском (волновом) генезисе этих образований, представляющих собой подводные бары. Способ образования подобных форм описан в современных публикациях (Белошапков и др., 2001; Леонтьев и др., 2011; Леонтьев, 2014).

Вопрос о количестве трансгрессивно-регрессивных циклов и амплитуде изменения уровня моря в голоцене в Восточно-Сибирском море остается дискуссионным. Согласно наиболее распространенной точке зрения, 11 тыс. л. н. море находилось на уровне –50 м; в период с 11 по 8 тыс. л. н. скорость трансгрессии была очень высокой — до 1 см/год (Keigwin et al., 2006; Кловиткина, Полякова, 2021), уровень моря быстро поднимался (до –27 м), а к 5 тыс. л. н. достиг современного (Bauch et al., 2001). Ряд исследователей (например, Анисимов и др., 2002) предполагают наличие двух трансгрессивно-регрессивных циклов на протяжении последних 7.5 тыс. л. н. Быстрое развитие трансгрессии, активные процессы абразии и термоабразии создали благоприятные условия для формирования подводных баров на периферии о-ва Новая Сибирь.

Более сложным представляется вопрос об образовании гряд второго типа. Прежде всего важно отметить, что морфология и состав гряд на периферии о-ва Новая Сибирь исключают их интерпретацию в качестве конечно-моренных гряд. При развитии покровного оледенения с центром в районе о-вов Беннета (Басилян, Никольский, 2007) такие гряды должны иметь противоположную асимметрию склонов, по сравнению с наблюдаемой в действительности. Кроме того, обращает на себя внимание исключительно тонкозернистый состав отложений, представленных практически чистыми глинами, без включения грубообломочного материала, что не характерно для конечно-моренных образований. Исключает возможность их образования в ходе дегляциации среднеплейстоценового ледника и полученный в ходе наших исследований возраст отложений, слагающих гряды, а также подстилающих осадков (конец позднего неоплейстоцена).

Рис. 4. Колонки 20ВСМ-26, 20ВСМ-32 и 20ВСМ-35, отобранные на грядах внешней периферии морской равнины. Слева направо: фото керна, характеристика физических свойств, рассчитанная палеосоленость, содержание $C_{\text{орг}}$ и гистограммы гранулометрического состава.

Fig. 4. Cores (20VSM-26, 20VSM-32, 20VSM-35), sampled from the ridges of outer periphery of submarine plain: photos, characteristics of physical properties, calculated paleo-salinity, content of organic carbon and grain-size distribution histograms.

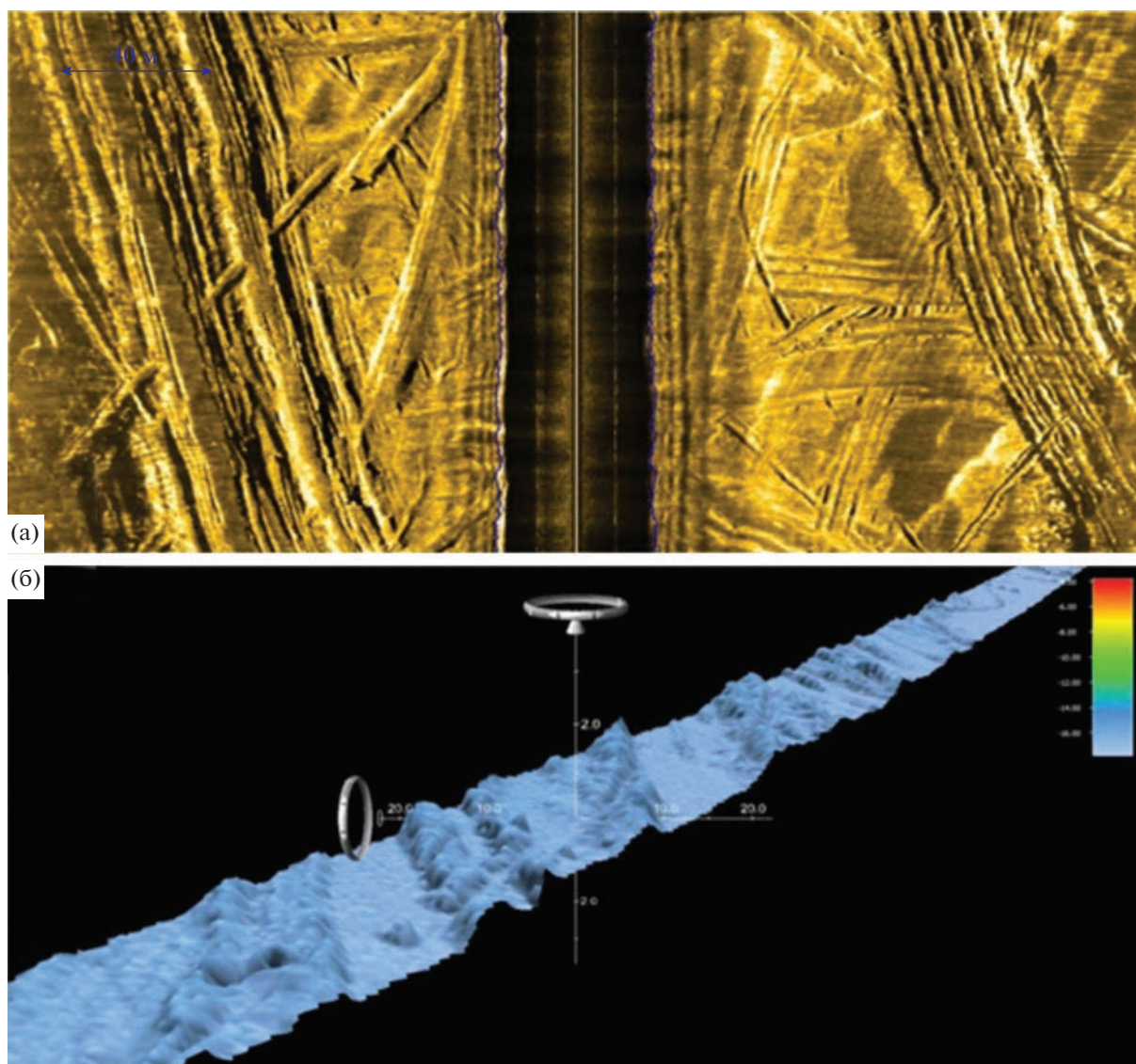


Рис. 5. Следы экзарации на дне по данным ГЛБО (а) и МЭ (б).

Fig. 5. Traces of ice exaration on the bottom surface according to the side-scan profiling data (a) and multibeam echo-sounder survey (b).

Состав отложений, морфология и возраст позволяют предположить, что формирование системы мористых гряд, прослеживаемых далее 30 км от берега о-ва Новая Сибирь, а также аналогичных по морфологии и составу гряд, выделяющихся по периферии палеодолин пра-Колымы и пра-Индиگیری, связано с денудационными процессами. Высокая плотность слагающих гряды отложений может свидетельствовать в пользу того, что в своем развитии они прошли субаэральную стадию.

Это не противоречит общим представлениям о значительной (до 100–130 м) предголоценовой регрессии (Bauch et al., 2001; Klemann et al., 2015; Cronin et al., 2017; Pitulko et al., 2019; Ключевкина, Полякова, 2021), когда береговая линия в западной части Восточно-Сибирского моря располагалась на

расстоянии более чем на 500 км к северу от современной (Дегтяренко и др., 1982; Klemann et al., 2015), а суша простиралась до о-ва Жохова. Таким образом, все участки дна, на которых установлены гряды второго типа, в период образования этих отложений (13.4–15.5 тыс. кал. л. н.) находились в субаэральных условиях.

Можно предположить, что также происходило селективное протаивание отложений, создавшее предпосылки для развития субаэральных денудационных процессов. Похожие формы погребенного рельефа, интерпретируемые как результат разрушения вечной мерзлоты, установлены на шельфе моря Лаптевых (Rekant et al., 2015). Это соответствует концепции развития шельфа морей Восточной Арктики в конце позднего неоплейстоцена и в голо-

цене, одним из наиболее важных положений которой является признание опережающего развития термокарста до затопления шельфа (Романовский и др., 1999). Можно предположить, что наряду с термокарстовыми явлениями и субаэральной денудацией определенную роль в формировании гряд и образовании останцового грядового и холмистогрядового рельефа могли играть неотектонические процессы. Конфигурация активных разломов и характер современных геодинамических процессов (Имаева и др., 2018) создают благоприятные условия для образования форм, субпараллельных современной береговой линии. Можно предположить также дальнейшую моделировку гряд в результате эрозийных процессов, происходивших в ходе голоценовой трансгрессии.

В то же время очевидно, что дать однозначный и окончательный ответ на вопрос о генезисе гряд данного типа в настоящее время не представляется возможным.

ВЫВОДЫ

1. Геолого-геофизические исследования подводных гряд южной части Восточно-Сибирского моря, рассматривавшихся ранее как единая система, показали, что по морфологии и составу отложений выделяются два принципиально различных типа этих образований.

2. Гряды, расположенные на прибрежных мелководьях и непосредственно примыкающие к о-ву Новая Сибирь (глубины моря 10–20 м; расстояние от берега – менее 30 км), имеют слабо асимметричную форму с более пологим склоном со стороны острова и более крутым мористым склоном и сложены хорошо сортированными мелкозернистыми песками. Морфология, стратиграфическое и батиметрическое положение гряд позволяют достаточно однозначно и уверенно определить их возраст и генезис, подтверждая гипотезу С.Л. Никифорова (1985, 1989), предположившего аккумулятивное прибрежно-морское (волновое) происхождение этих образований, представляющих собой подводные бары.

3. Гряды, расположенные на подводном цоколе о-ва Новая Сибирь, мористее (глубины моря – 20–30 м; расстояние от берега – 30–85 км), имеют резко асимметричную форму с пологим склоном, ориентированным в сторону моря, и крутым – в сторону берега. Морфология, состав отложений (плотные алевроитовые глины) и возраст (конец позднего неоплейстоцена, 13.4–15.5 тыс. кал. л.) этих гряд, а также аналогичных по морфологии и составу форм, выделяющихся по периферии палеодолин пра-Колымы и пра-Индиголки, исключают возможность их интерпретации в качестве конечно-моренных образований среднеплейстоценового оледенения. Предположительно, генезис гряд этого типа связан

с термокарстовыми процессами и субаэральной денудацией на фоне неотектонических движений. Данный вопрос требует дальнейших исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Полевые работы осуществлены в 2018–2020 гг. в рамках Государственного задания ФГБУ “ВСЕГЕИ” (ГК-1000/3 листов R-56-60, S-55,56). Аналитические исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-27-00412.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Анисимов М.А., Тумской В.Е., Саватюгин Л.М. (2002). К вопросу об изменениях природных условий Новосибирских островов в позднем плейстоцене и голоцене // Известия РГО. Т. 134. Вып. 5. С. 32–37.
- Бартова А.В. (2021). История геологического развития низовьев Колымы в кайнозое // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы XI Всероссийской научно-практической конференции, 05–07 апреля 2021 г. Якутск: Издательский дом СВФУ. С. 11–14.
- Басилян А.Э., Никольский П.А. (2007). О плейстоценовом оледенении Новосибирских островов // Геологические события неогена и квартала России // Современное состояние стратиграфических схем и палеогеографические реконструкции: материалы Всероссийского научного совещания, Москва, 27–30 марта 2007 г. М.: ГЕОС. С. 10–12.
- Белошапков А.В., Гордин А.И., Ильин В.В., Путлов В.Ф. (2001). Аккумулятивные формы прибрежной зоны и шельфа северо-восточного Сахалина // Человечество и береговая зона мирового океана в XXI веке. М.: ГЕОС. С. 126–140.
- Григорьев А.Г., Жамойда В.А., Спиридонов М.А. и др. (2009). Новые данные по истории развития юго-восточной части Балтийского моря от позднеленинговья до современности // Региональная геология и металлогения. № 40. С. 103–114.
- Григорьев М.Н., Разумов С.О., Куницкий В.В., Спектор В.Б. (2006). Динамика берегов восточных Арктических морей России: основные факторы, закономерности и тенденции // Криосфера Земли. Т. 10. № 4. С. 74–94.
- Дегтяренко Ю.П., Пуминов А.П., Благовещенский М.Г. (1982). Береговые линии восточно-арктических морей в позднем плейстоцене и голоцене // Коледания уровня морей и океанов за 15000 лет. М.: Наука. С. 179–185.
- Добровольский А.Д., Залогин Б.С. (1982). Моря СССР. М.: Изд-во МГУ. 192 с.
- Дударев О.В., Чаркин А.Н., Семилетов И.П. и др. (2007). Современное осадкообразование на приконтинентальном шельфе Восточно-Сибирского моря // Дальневосточные моря России. Кн. 2. Исследования морских экосистем и биоресурсов. М.: Наука. С. 382–391.

- Жамойда В.А., Сергеев А.Ю., Буданов Л.М. и др. (2020). Новые данные о формировании плиоцен-четвертичных отложений Восточно-Сибирского моря по результатам геологического картирования акваториальной части листов R56-60 // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Вып. 7. С. 66–75.
<https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10710>
- Имаева Л.П., Имаев В.С., Мельникова В.И. (2018). Напряженно-деформированное состояние новейших структур северо-восточного сектора Российской Арктики // ДАН. Т. 479. № 2. С. 192–194.
<https://doi.org/10.7868/S0869565218080170>
- Клювиткина Т.С., Полякова Е.И. (2021). История моря Лаптевых: зачем палеогеографам микроводоросли? // Природа. № 6. С. 31–44.
<https://doi.org/10.7868/S0032874X21060041>
- Леонтьев И.О. (2014). Морфодинамические процессы в береговой зоне моря. LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland / Германия. 251 с. ISBN: 978-3-659-62831-3
- Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сухачева Л.Л., Сергеев А.Ю. (2011). О генезисе некоторых форм рельефа дна и берегов восточной части Финского залива // Океанология. Т. 51. № 4. С. 734–745.
- Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э. и др. (2020). Экологическое состояние и минералогическо-геохимические характеристики донных осадков Восточно-Сибирского моря // Океанология. Т. 60. № 4. С. 595–610.
<https://doi.org/10.31857/S0030157420040152>
- Никифоров С.Л. (1985). Подводные аккумулятивные формы на шельфе Восточно-Сибирского моря // Геология и геоморфология шельфов и материковых склонов. М: Наука. С. 96–101.
- Никифоров С.Л. (1989). Основные черты развития шельфа Чукотского и Восточно-Сибирского морей в позднелейстоцен-голоценовое время // Геоморфология. № 3. С. 85–89.
- Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Дударев О.В. (2013). Особенности минерального состава осадков шельфа восточной части моря Лаптевых и Восточно-Сибирского // Океанология. Т. 53. № 4. С. 529–538.
<https://doi.org/10.7868/S0030157413040084>
- Огородов С.А. (2014). Рельефообразующая роль морских льдов. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. М.: МГУ. 44 с.
- Павлидис Ю.А., Леонтьев И.О. (2000). Прогноз развития береговой зоны Восточно-Сибирского моря при повышении уровня и потепления климата // Вестник РФФИ. № 1 (19). С. 31–39.
- Петровская Н.А., Савишкина М.А. (2014). Сопоставление сейсмокомплексов и основных несогласий в осадочном чехле шельфа Восточной Арктики // Нефтегазовая геология. Теория и практика. № 9. С. 1–26.
- Рекант П.В., Петров О.В., Прищепенко Д.В. (2020). Формирование складчато-надвиговой структуры южной части шельфа Восточно-Сибирского моря по результатам структурного анализа сейсмических материалов // Региональная геология и металлогения. № 82. С. 35–59.
- Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др. (1999). Термокарст и его роль в формировании прибрежной зоны шельфа моря Лаптевых // Криосфера Земли. Т. 3. № 3. С. 79–91.
- Сакулина Т.С., Верба М.Л., Кашубина Т.В. и др. (2011). Комплексные геолого-геофизические исследования на опорном профиле 5-АР в Восточно-Сибирском море // Разведка и охрана недр. № 10. С. 17–23.
- Семенов Ю.П. (1965). О некоторых особенностях формирования донных отложений Восточно-Сибирского и Чукотского морей // Антропогенный период в Арктике и Субарктике // Труды НИИГА. Т. 143. М.: Недра. С. 350–352.
- Яшин Д.С. (2000). Голоценовый седиментогенез арктических морей России // Геолого-геофизические характеристики литосферы Арктического региона. № 3. С. 57–67.
- Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al. (2001). Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin // Global and Planetary Change. Vol. 31. Iss. 1–4. P. 125–139.
[https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00116-3)
- Cronin T.M., O'Regan M., Pearce C. et al. (2017). Deglacial sea level history of the East Siberian Sea and Chukchi Sea margins // Climate of the Past. Vol. 13. Iss. 9. P. 1097–1110.
<https://doi.org/10.5194/cp-13-1097-2017>
- Keigwin L.D., Donnelly J.P., Cook M.S. et al. (2006). Rapid sea-level rise and Holocene climate in the Chukchi Sea // Geology. Vol. 34. No. 10. P. 861–864.
- Klemann V., Heim B., Bauch H.A. et al. (2015). Sea-level evolution of the Laptev Sea and the East Siberian Sea since the last glacial maximum // Arktos. No. 1.
<https://doi.org/10.1007/s41063-015-0004-x>
- Pitulko V.V., Kuzmin Y.V., Glascock M.D. et al. (2019). They came from the ends of the earth: long-distance exchange of obsidian in the High Arctic during the Early Holocene // Antiquity. No. 93 (367). P. 28–44.
<https://doi.org/10.15184/aqy.2019.2>
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP) // Radiocarbon. No. 62. P. 725–757.
<https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rekant P., Bauch H.A., Schwenk T. et al. (2015). Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea // Arktos. No. 11.
<https://doi.org/10.1007/s41063-015-0011-y>

MORPHOLOGY AND GENESIS OF UNDERWATER BARS AND RIDGES OF THE EAST SIBERIAN SEA⁴

A. Yu. Sergeev^{a, #}, D. V. Ryabchuk^a, V. A. Zhamoida^a, L. M. Budanov^a, O. A. Kovaleva^a, I. A. Neevin^a,
M. Yu. Tokarev^{b, ##}, L. D. Bashirova^{c, ###}, and E. P. Ponomarenko^c

^aKarpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russia

^bLomonosov Moscow State University, Faculty of Geology, Moscow, Russia

^cShirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

[#]E-mail: sergeevau@yandex.ru

^{##}E-mail: mjtokarev@gmail.com

^{###}E-mail: bas_leila@mail.ru

Shelf zone of the East-Siberian Sea is one of the least studied marine areas of the Russian Arctic. One of the important unsolved problems is the existence of a ice sheet in the area of the New Siberian Islands, and the debate about the age and genesis of underwater ridges (bars). Based on geological and geophysical field work conducted by VSEGEI in 2018 and 2020, laboratory research, and data analyses, two types of submarine ridges, principally different in morphology, sediment composition, age, and genesis were identified. Ridges located within the submarine plain on the outer periphery of the submerged valley of the Pra-Kolyma river and around the New Sibir' Island are asymmetric, have a relative height of 1–2 m to 4–6 m, an average width of 2–4 km (up to a few tens of km) and an average length of 25–30 km (up to 100 km). According to the sampling data, the ridges of this type are composed of very dense clayey-silt without inclusion of coarse clastic material. The age of the deposits forming the ridges is Late Pleistocene (18–13 ka BP). Formations of the Upper Pleistocene age are exposed in the inter-ridge hollows. The composition, morphology, and age of the ridge deposits suggest that their genesis is associated with denudation processes, but the mechanism of their formation is not obvious. The second type of ridges includes a system of coastal bars located at a distance of up to 30 km from the coast of New Sibir' Island and composed of fine-grained, well-sorted sands. The width of the ridges varies from 1 to 2 km, the height is from 4 to 8 m, and the length is 10–15 km. The ramparts have a slightly asymmetric shape, with a gentler slope from the side of the island. This system of ridges was formed as a result of accumulative processes in the Holocene. The obtained data do not support the hypothesis of the extension of the Late Pleistocene ice sheet to the shelf.

Keywords: seabed topography, offshore, Arctic, underwater shafts, sub bottom profiling, Holocene, Pleistocene

ACKNOWLEDGEMENTS

Field work was carried out within the framework of the State Assignment of the FSBI "VSEGEI" (Geological mapping – 1000/3, map sheets R-56-60, S-55,56). Grain-size analysis, determination of the content of Corg and data analysis was carried out with the support of the RSF grant No. 22-27-00412.

REFERENCES

- Anisimov M.A., Tumskoy V.E., Savatyugin L.M. (2002). On the question of changes in the natural conditions of the Novosibirsk Islands in the Late Pleistocene and Holocene. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo obshchestva*. Vol. 134. Iss. 5. P. 32–37. (in Russ.)
- Bartova A.V. (2021). History of geological development of the lower reaches of the Kolyma in the Cenozoic. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Severo-Vostoka Rossii: materialy XI Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 05–07 aprelya 2021 g.* Yakutsk: SVFU (Publ.). P. 11–14. (in Russ.)
- Basilyan A.E., Nikolsky P.A. (2007). On the Pleistocene glaciation of the Novosibirsk Islands. *Geologicheskie so-bytiya neogena i kvartera Rossii. Sovremennoe sostoyanie stratigraficheskikh skhem i paleogeograficheskie rekonstruktsii: materialy Vserossiiskogo nauchnogo soveshchaniya, Moskva, 27–30 marta 2007 g.* Moscow: GEOS (Publ.). P. 10–12. (in Russ.)
- Bauch H.A., Mueller-Lupp T., Taldenkova E. et al. (2001). Chronology of the Holocene transgression at the North Siberian margin. *Global and Planetary Change*. Vol. 31. Iss. 1–4. P. 125–139. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(01\)00116-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(01)00116-3)
- Beloshapkov A.V., Gordin A.I., Ilyin V.V., Putov V.F. (2001). Accumulative forms of the coastal zone and shelf of northeastern Sakhalin. *Humanity and the coastal zone of the world ocean in the XXI century*. Moscow: GEOS. P. 126–140. (in Russ.)
- Cronin T.M., O'Regan M., Pearce C. et al. (2017). Deglacial sea level history of the East Siberian Sea and Chukchi Sea margins. *Climate of the Past*. Vol. 13. Iss. 9. P. 1097–1110. <https://doi.org/10.5194/cp-13-1097-2017>

⁴ For citation: Sergeev A.Yu., Ryabchuk D.V., Zhamoida V.A. et al. (2023). Morphology and genesis of underwater bars and ridges of the East-Siberian Sea. *Geomorfologiya i Paleogeografiya*. Vol. 54. No. 3. P. 26–38. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S294917892303009X>; <https://elibrary.ru/WDUFPE>

- Degtyarenko Yu.P., Puminov A.P., Blagoveshchenskiy M.G. (1982). Coastlines of the Eastern Arctic seas in the Late Pleistocene and Holocene. *Kolebaniya urovnya morei i okeanov za 15 000 let*. Moscow: Nauka (Publ.). P. 179–185. (in Russ.)
- Dobrovolsky A.D., Zalogin B.S. (1982). Seas of the USSR. Moscow: MSU (Publ.). 192 p. (in Russ.)
- Dudarev O.V., Charkin A.N., Semiletov I.P. et al. (2007). Modern sedimentation on the near-continental shelf of the East-Siberian sea. Moscow: Nauka (Publ.). P. 382–391. (in Russ.)
- Grigoriev A.G., Zhamoida V.A., Spiridonov M.A. et al. (2009). New data on the history of the development of the southeastern part of the Baltic Sea from the Late Glacial period to the present. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. No. 40. P. 103–114. (in Russ.)
- Grigoriev M.N., Razumov S.O., Kunitsky V.V., Spector V.B. (2006). Dynamics of the shores of the Eastern Arctic seas of Russia: main factors, patterns and trends. *Kriosfera Zemli*. Vol. 10. No. 4. P. 74–94. (in Russ.)
- Imaeva L.P., Imaev V.S., Melnikova V.I. (2018). Stress-strain state of the newest structures of the North-Eastern sector of the Russian Arctic. *Reports of the Academy of Sciences*. Vol. 479. No. 2. P. 192–194. <https://doi.org/10.7868/S0869565218080170>
- Keigwin L.D., Donnelly J.P., Cook M.S. et al. (2006). Rapid sea-level rise and Holocene climate in the Chukchi Sea. *Geology*. Vol. 34. No. 10. P. 861–864.
- Klemann V., Heim B., Bauch H.A. et al. (2015). Sea-level evolution of the Laptev Sea and the East Siberian Sea since the last glacial maximum. *Arktos*. No. 1. <https://doi.org/10.1007/s41063-015-0004-x>
- Klyuvitkina T.S., Polyakova E.I. (2021). History of the Laptev Sea: why do paleogeographers need microalgae? *Priroda*. No. 6. P. 31–44. (in Russ.) <https://doi.org/10.7868/S0032874X21060041>
- Leont'ev I.O. (2014). *Morfodinamicheskie protsessy v beregovoi zone morya* (Morphodynamic processes in the coastal zone of the sea). LAP LAMBERT Academic Publishing. Saarbrücken, Deutschland / Germany. 251 p. (in Russ.). ISBN: 978-3-659-62831-3
- Leont'ev I.O., Ryabchuk D.V., Sergeev A.Yu., Sukhacheva L.L. (2011). On the genesis of some bottom and coastal features in the Eastern Gulf of Finland. *Oceanology*. Vol. 51. No. 4. P. 688–698. <https://doi.org/10.1134/S0001437011040102>
- Miroshnikov A.Yu., Flint M.V., Asadulin E.E. et al. (2020). Ecological state and mineralogical-geochemical characteristics of bottom sediments of the East Siberian Sea. *Okeanology*. Vol. 60. Iss. 4. P. 518–531. <https://doi.org/10.1134/S0001437020040141>
- Nikiforov S.L. (1985). Underwater accumulative forms on the shelf of the East Siberian Sea. *Geologiya i geomorfologiya shel'fov i materikovyykh sklonov*. Moscow: Nauka (Publ.). P. 96–101 (in Russ.)
- Nikiforov S.L. (1989). The main features of the development of the shelf of the Chukchi and East Siberian Seas in the Late Pleistocene-Holocene time. *Geomorfologiya*. No. 3. P. 85–89 (in Russ.)
- Nikolaeva N.A., Derkachev A.N., Dudarev O.V. (2013). Features of the mineral composition of sediments of the shelf of the eastern part of the Laptev and East Siberian Seas. *Okeanology*. Vol. 53. Iss. 4. P. 472–480. <https://doi.org/10.1134/S0001437013040073>
- Ogorodov S.A. (2014). *Rel'efoobrazuyushchaya rol' morskikh l'dov* (The relief-forming role of sea ice). *Prof. thesis*. Moscow: MSU (Publ.). 44 p. (in Russ.)
- Pavlidis Yu.A., Leontiev I.O. (2000). Forecast of the development of the coastal zone of the East Siberian Sea with an increase in the level and warming of the climate. *Vestnik RFFI*. No. 1 (19). P. 31–39. (in Russ.)
- Petrovskaya N.A., Savushkina M.A. (2014). Comparison of seismic complexes and major inconsistencies in the sedimentary cover of the Eastern Arctic shelf. *Neft-egazovaya geologiya. Teoriya i praktika*. No. 9. P. 1–26. (in Russ.)
- Pitulko V.V., Kuzmin Y.V., Glascock M.D. et al. (2019). They came from the ends of the earth': long-distance exchange of obsidian in the High Arctic during the Early Holocene. *Antiquity*. No. 93 (367). P. 28–44. <https://doi.org/10.15184/aqy.2019.2>
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E. et al. (2020). The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal kBP). *Radiocarbon*. No. 62. P. 725–757. <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Rekant P., Bauch H.A., Schwenk T. et al. (2015). Evolution of subsea permafrost landscapes in Arctic Siberia since the Late Pleistocene: a synoptic insight from acoustic data of the Laptev Sea. *Arktos*. No. 11. <https://doi.org/10.1007/s41063-015-0011-y>
- Rekant P.V., Petrov O.V., Prishchepenko D.V. (2020). Formation of the fold-thrust structure of the southern part of the shelf of the East Siberian Sea based on the results of structural analysis of seismic materials. *Regional'naya geologiya i metallogeniya*. No. 82. P. 35–59. (in Russ.)
- Romanovsky N.N., Gavrilov A.V., Tumskoy V.E. et al. (1999). Thermokarst and its role in the formation of the coastal zone of the Laptev Sea shelf. *Kriosfera Zemli*. Iss. 3. No. 3. P. 79–91. (in Russ.)
- Sakulina T.S., Verba M.L., Kashubina T.V. et al. (2011). Complex geological and geophysical studies on the 5-AR reference profile in the East Siberian Sea. *Razvedka i okhrana nedr*. No. 10. P. 17–23. (in Russ.)
- Semenov Yu.P. (1965). On some features of the formation of bottom sediments of the East Siberian and Chukchi Seas. *Antropogenovyi period v Arktike i Subarktike. Trudy NIIGA*. Vol. 143. Moscow: Nedra (Publ.). P. 350–352. (in Russ.)
- Yashin D.S. (2000). Holocene sedimentogenesis of the Arctic seas of Russia. *Geologo-geofizicheskie kharakteristiki litosfery Arkticheskogo regiona*. No. 3. P. 57–67. (in Russ.)
- Zhamoida V.A., Sergeev A.Yu., Budanov L.M. et al. (2020). New data on the formation of Pliocene-Quaternary deposits of the Eastern Siberian Sea from the results of geological offshore mapping of R56–60 sheets of state geological map. *Rel'ef i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii*. Iss. 7. P. 66–75. (in Russ.). <https://doi.org/10.24411/2687-1092-2020-10710>