

УДК 552.5

СОДЕРЖАНИЕ И СОСТАВ ДОННО-КАМЕННОГО МАТЕРИАЛА НА ХРЕБТЕ ЛОМОНОСОВА (83° С. Ш.): ИНДИКАЦИЯ СМЕНЫ ПАЛЕООБСТАНОВОК

© 2024 г. Е. А. Попова^{1,2,*}, В. А. Богин^{1,2}, С. А. Малышев^{1,2},
К. В. Фильчук², А. С. Макаров², академик РАН В. Д. Каминский¹

Поступило 04.03.2024 г.

После доработки 02.04.2024 г.

Принято к публикации 08.04.2024 г.

Представлены результаты изучения количественного, вещественного и морфометрического состава донно-каменного материала (ДКМ) в осадках, отобранных бокс-корером на хребте Ломоносова (83° с.ш.), Северный Ледовитый океан, в ходе экспедиции “Северный полюс – 41” (ААНИИ). Материал размером ≥ 1 см отбирался отдельно из каждого слоя, выделенного при литологическом описании. Возрастная модель создана путём литостратиграфической корреляции с датированными ранее колонками. Содержание крупных обломков ДКМ на восточном склоне и вершине на порядок выше, чем на западном склоне, что объясняется более высокой скоростью осадконакопления на западном склоне после пика таяния ледников. Смена состава пород с карбонатных на магматические и улучшение степени окатанности со временем указывают на увеличение доли привноса материала из Евразии в МИС 1.

Ключевые слова: материал ледового разноса, поздний плейстоцен, Северный Ледовитый океан, хребет Ломоносова

DOI: 10.31857/S2686739724080025

Данные по распределению, петрографическому и количественному составу материала ледового разноса в Северном Ледовитом океане (СЛО) позволяют провести реконструкцию ледовой обстановки и циркуляции в Арктике в прошлом [4, 6, 11]. СЛО имеет свою специфику, связанную с полярным расположением, вследствие чего осадконакопление здесь обладает рядом особенностей. Одна из них — привнос большого количества материала ледового разноса (ice-rafted debris — IRD) — как с морским льдом, так и с айсбергами, откалывающимися от ледников [7]. Более спокойное осадконакопление на хребтах по сравнению с глубоководными котловинами, подверженными воздействию склоновых процессов, даёт возможность достаточно детально изучить изменения обстановок осадконакопления в СЛО. Именно вблизи хр. Ломоносова проходит раздел между двумя основными

системами ледяной циркуляции в Арктике — Трансарктическим течением и круговоротом Бофорта [3], поэтому рассмотрение осадконакопления по профилю поперёк хребта представляет собой особый интерес. Распространённый подход к работе с крупными обломками в осадках — отбор обломков определённого размера из разрезов, позволяет получить данные по качественному и количественному составу [5, 6, 10]. В некоторых исследованиях рассматривается вся масса материала из бокс-корера, в то время как в данной работе обломки были отобраны отдельно из каждого литологического слоя, отражающего смену обстановок осадконакопления. Так как материал отобран на хребте вне зон обнажений фундамента, обломки, изученные в данной работе, приравниваются к материалу ледового разноса. Новые данные по составу, количеству и форме частиц ледового разноса помогут уточнить палеообстановки и циркуляцию в Арктике в позднем плейстоцене.

Материал был отобран в октябре-ноябре 2022 г. в ходе экспедиции “Северный полюс – 41” (ААНИИ), проводившейся на борту ЛСП “Северный Полюс”. Работа основана на материале

¹Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана имени академика И.С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: lena-porova-l@mail.ru

из 13 станций, взятых при помощи бокс-корера и слагающих профиль поперёк хребта Ломоносова в районе 83° с. ш. на глубинах от 2630 до 1212 м (табл. 1, рис. 1). Материал был разделён согласно литологическим слоям (при описании использовалась цветовая шкала [9]), просеян через сито с диаметром ячеек 0.5 мм в мокром состоянии и высушен, после чего все обломки размером ≥ 1 см были отобраны и изучены. Определение качественного состава обломков проводилось при помощи бинокля путём первичной идентификации минералов на основе окраски, твёрдости, формы зёрен, определения структуры и текстуры обломков, размера частиц в случае осадочных пород. Карбонатные породы дополнительно идентифицировались путём проведения реакции с соляной кислотой различной концентрации: в случае яркой реакции уже с 1Н-раствором порода была отнесена к известняку, слабой реакции даже с 3Н-раствором — к доломиту. Для предварительного изучения вещественного состава осадков из материала каждого литологического слоя были изготовлены смер-слайды и изучены при помощи микроскопа. Степень окатанности определялась с использованием визуальных трафаретов Хабакова [2] и Ваделла [15]. Обломки были поделены на пять классов: 1) неокатанные (класс 0 по шкале Хабакова, коэффициент 0.11–0.20 по методу Ваделла), 2) угловатые (1 и 0.27–0.40), 3) полуокатанные (2 и 0.41–0.60), 4) хорошо окатанные (3 и 0.61–0.80), 5) отлично окатанные (4 и 0.81–0.90). Форма обломков описывалась по методу Цинга [16]: были измерены три главных оси (длинная, средняя и короткая) и подсчитаны отношения средней оси к длинной (с/д) и короткой к средней (к/с) для характеристики степени удлинённости и уплощённости соответственно. Все обломки были поделены на четыре группы: 1) дисковидные/уплощённые — с/д >0.66 , к/с <0.66 ; 2) изометричные — с/д >0.66 , к/с >0.66 ; 3) пластинчатые — с/д <0.66 , к/с <0.66 ; 4) удлинённые — с/д <0.66 , к/с >0.66 . Привязка станций к различным морфоструктурам хребта осуществлялась при помощи глубинного параметрического профилографа PARASOUND P70 ICE (“Teledyne Marine”, США). Магнитная восприимчивость в длинной колонке СП41-23Т была измерена при помощи измерителя MS2E (“Bartington”).

В разрезах мощностью от 32 до 54 см выделено пять слоёв, литологическое описание которых приведено ниже (сверху вниз, рис. 2). 1. “Коричневый-1” — алевропелит с примесью песка, имеющий оливково-коричневый цвет (2.5Y 4/3 olive brown) на восточном склоне и вершине и более

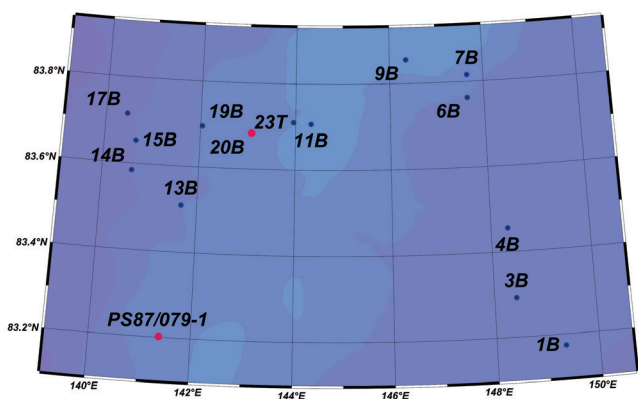


Рис. 1. Схема расположения геологических станций.

тёмный оттенок (10YR 4/3 brown) на западном склоне. Текстура массивная, осадок мягкий с признаками биотурбации. Контакт постепенный по цвету. Мощность слоя постепенно увеличивается по профилю от 2 см на восточном склоне до 54 см на западном, где он представляет весь разрез. 2. “Серо-коричневый” — алевропелит тёмно-серо-коричневого цвета (2.5Y 4/2 dark grayish brown), плотный, с нижним контактом чётким по цвету. Текстура преимущественно массивная. Его мощность колеблется от 9 см на восточном склоне до 30 см на вершине хребта; как и последующие слои, он не представлен в колонках западного склона. 3. “Тёмно-серо-коричневый” — алевропелит очень тёмно-серо-коричневого цвета (2.5Y 3/2 very dark grayish brown), плотный, с нижним контактом чётким или постепенным по цвету. Текстура массивная. Мощность невелика, 4–6 см. 4. “Бежевый” — алевропелит, пелит с примесью песка светло-оливково-коричневого цвета (2.5Y 5/3 light olive brown), очень мягкий, чем отличается от других слоёв; встречаются комочки осадков. Текстура, как правило, массивная. Контакт с нижним слоем постепенный по цвету. Слой отличается высоким содержанием частиц карбонатных пород в смер-слайдах. Мощность составляет от 10 см в колонке 7Б, где слой граничит снизу со следующим, до видимых 18 см в колонке 9Б. 5. “Коричневый-2” — алевропелит с примесью песка оливково-коричневого цвета (2.5Y 4/3 olive brown) с массивной текстурой, чуть более плотный, чем верхний “коричневый” слой. Замечен лишь в колонках 7Б и 6Б, где его видимая мощность достигает 12 см.

Обломки в количестве 164 штук распределены неравномерно как вдоль профиля, так и в пределах разрезов. На восточном склоне и вершине хребта, наблюдается стабильно высокое

Таблица 1. Список всех станций и информация о содержании ДКМ

Станция*	Широта, N	Долгота, E	Глубина воды, м	Положение на хребте	Объём, м³	Количество обломков (N)	N/м³
SP41-1B	83.1744	149.3446	2278	Восточный склон	0.6	25	44.6
SP41-3B	83.292333	148.4349	2012		0.8	14	18.6
SP41-4B	83.4546	148.3389	2401		0.6	18	28.1
SP41-6B	83.7627	147.6448	1730		1.2	23	19.2
SP41-7B	83.8155	147.6538	1344	Вершина	0.7	20	27.2
SP41-9B	83.854767	146.3522	1212		1.1	31	28.2
SP41-11B	83.706733	144.3279	1282		0.7	11	15.3
SP41-20B	83.68285	143.0702	1462		0.8	15	17.7
SP41-23T	83.70988	143.95419	1340		—	—	—
SP41-13B	83.5095	141.6805	2002	Западный склон	0.8	1	1.3
SP41-19B	83.6958	142.0391	2128		0.7	2	2.8
SP41-14B	83.5843	140.62	2523		0.8	1	1.2
SP41-15B	83.653367	140.6643	2611		0.8	2	2.4
SP41-17B	83.714267	140.4438	2630		1.2	1	0.8

Примечание. * В – бокс-корер, Т – гравитационная трубка.

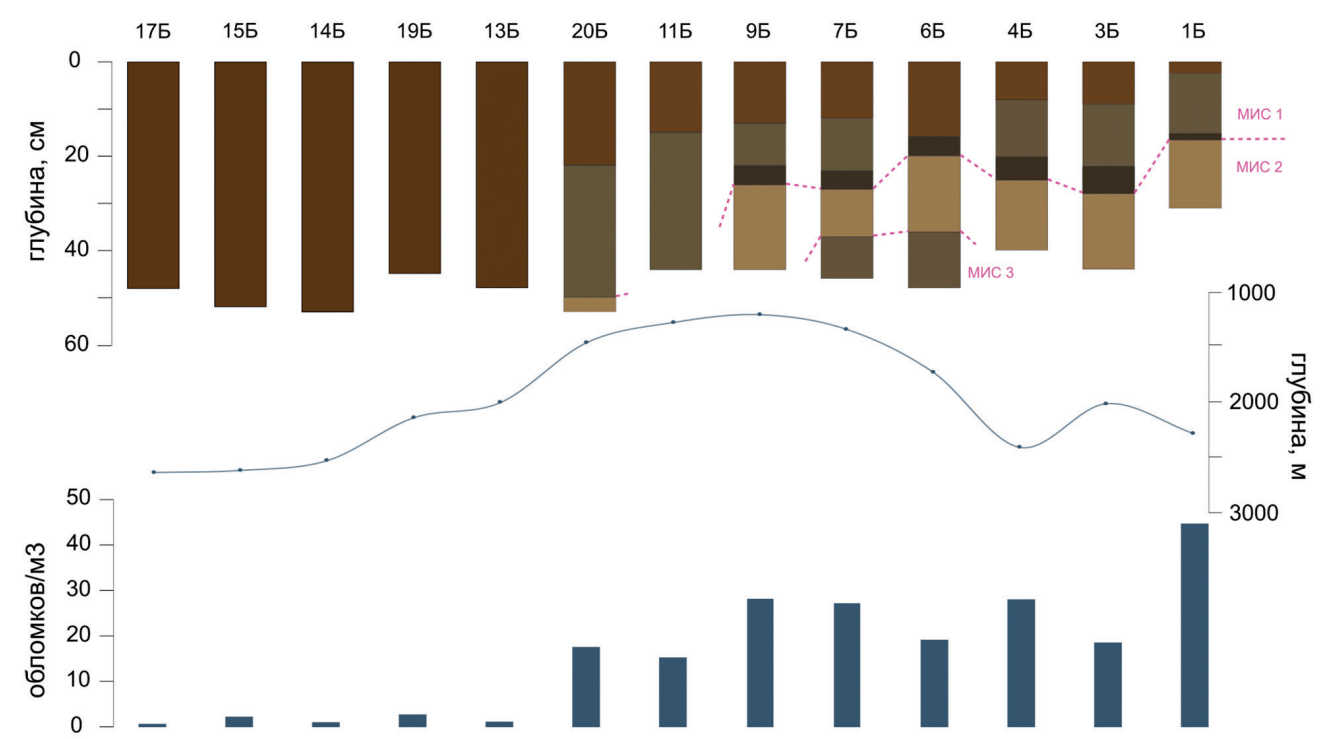


Рис. 2. Схематичное литологическое строение разрезов, глубина отбора материала и содержание обломков в объёме бокс-корера. Розовым пунктиром показаны предполагаемые границы МИС

содержание ДКМ (15–45 обломков/м³), в то время как на западном склоне встречаемость не превышает 3 обломков/м³ в бокс-корере (рис. 2). При этом содержание достигает своего пика в 495 обломков/м³ в “тёмно-серо-коричневом” слое, после чего снижается на порядок к поверхностному слою (рис. 3).

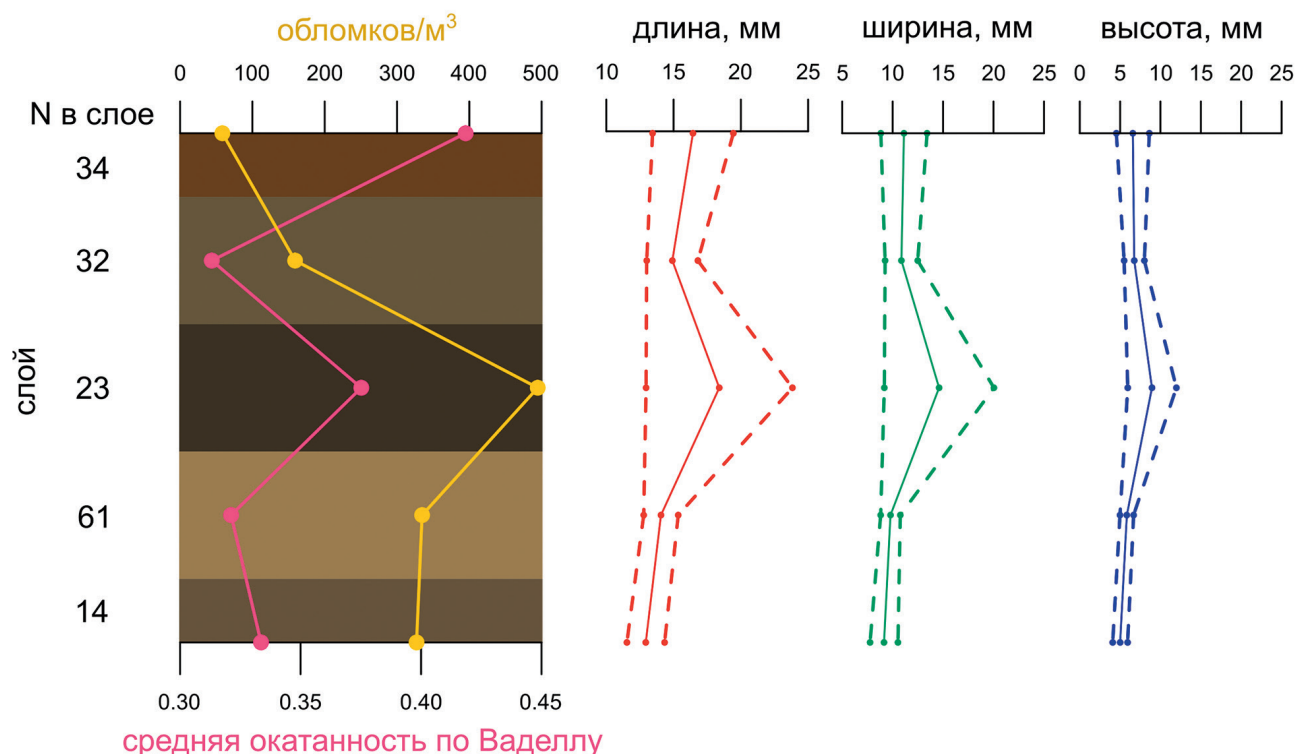


Рис. 3. Изменение количества, размеров и формы обломков в зависимости от слоя: количество и содержание обломков в объёме каждого слоя, средняя окатанность по Ваделлу и три измерения (длина, ширина и высота): сплошной линией показано среднее по слою, пунктиром — границы доверительного интервала для 95%. Слева приведено количество обломков в каждом слое (сумма). Слои отображены без вертикального масштаба.

Обломки небольшие: наибольшее (ось д) измерение 67% обломков колеблется в пределах 10–15 мм, 26% — от 15 до 25 мм, и лишь 7% от 25 до 60 мм. Вдоль разреза их размер варьирует незначительно за исключением явного пика по всем трём измерениям в “тёмно-серо-коричневом” слое (рис. 3). По форме обломки достаточно разнообразны, тем не менее, наиболее активно представлены дисковидные обломки — 37%, изометричные составляют 27%, удлинённые и пластинчатые — примерно по 18%. Можно отметить, что здесь обнаружено больше плоских обломков, чем, например, в жёлобе Франц-Виктория, расположенном ближе к материку [1]. Содержание дисковидных обломков несколько снижается к поверхности, а то время как изометричных — увеличивается в подповерхностных слоях (“тёмно-серо-коричневом” и “серо-коричневом”). Материал окатан достаточно слабо — чуть больше половины всех обломков (54%) составляют угловатые, 22% — полуокатанные, 17% — неокатанные, 6% — хорошо окатанные и 1% — отлично окатанные. Рассмотрение степени окатанности вдоль разреза позволяет

отметить наилучшую окатанность обломков в поверхностном горизонте: 0.42 по шкале Ваделла в среднем, что эквивалентно классу полуокатанных, в то время как в нижерасположенных слоях средняя окатанность соответствует классу угловатых (рис. 3).

По составу обломки разделены на терригенные осадочные, карбонатные, магматические и метаморфические породы и аутигенные компоненты, представленные железомарганцевыми образованиями (ЖМО). Заметно доминирование карбонатных пород (38%). Содержание обломков магматических, терригенных осадочных и метаморфических пород примерно равно и составляет по 18–22%; ЖМО слагают около 3%. При движении снизу вверх по разрезу карбонатные и метаморфические породы замещаются магматическими; содержание терригенных осадочных пород достаточно стабильно (рис. 4).

На западном склоне вскрыт исключительно поверхностный коричневый слой (рис. 2), небогатый обломками вне зависимости от расположения. Можно предположить, что слой,

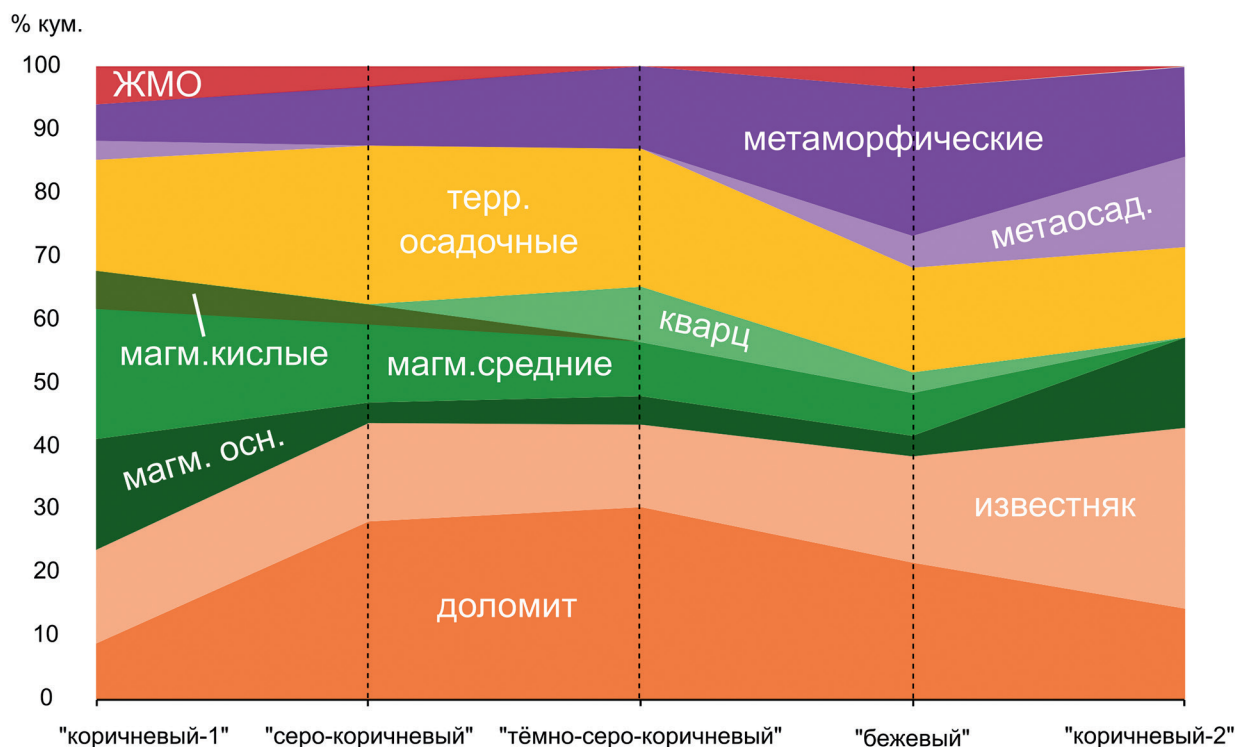


Рис. 4. Изменение содержания состава обломков в зависимости от слоя (кумулятивный % по слою).

обогащённые подобным материалом, располагаются на западном склоне глубже. Однако провести корректный количественный анализ для проверки гипотезы сложно по причине небольшого объёма ДКМ, отбираемого обычно при помощи длинных пробоотборников.

Для получения информации о примерном возрасте отложений была проведена литостратиграфическая корреляция колонки СП41-23Т с отобранными ранее датированными колонками PS87/079-1 [13] и PS2757-8 [8] с учётом характера колебаний магнитной восприимчивости (рис. 1, 5). Согласно предварительной возрастной модели, "бежевый" слой представляет собой МИС 2. Расчёты показали, что в исследуемом районе скорости осадконакопления в течение МИС 1 варьируют от 1.3 см/тыс. лет в наиболее восточном бокс-корере 1Б до не менее 3.9 см/тыс. лет в разрезах на западном склоне, где контакт МИС 2/МИС 1 не был вскрыт. Это показывает, что как минимум после таяния ледников последнего оледенения количество терригенного материала, приносимого на западный склон хребта, значительно превышало таковое на вершине хребта и восточном склоне. Следовательно, количественный состав ДКМ в осадках, отобранных при помощи бокс-корера, не

может быть использован как индикатор интенсивности привноса обломков без учёта литологического строения и возраста отложений.

Разность в степени окатанности отражает скорее свойства пород, чем способ транспорта частиц: на это указывает лучшая окатанность мягких осадочных пород (0.37–0.42 по шкале Ваделла) и худшая устойчивых кварца и кварцита (0.25). Исключение составляют магматические породы, степень окатанности которых выше, чем даже у алеврита (наилучшая окатанность отмечена у магматических основных пород – 0.43). Это заставляет предположить пребывание таких обломков в течение длительного времени в среде с высокой гидродинамической активностью – например, в прибрежной зоне. Улучшение окатанности ДКМ вверх по разрезу, вероятно, свидетельствует об уменьшении длительности ледяного покрова в период накопления более молодых осадков, что является причиной более активной гидродинамики в волноприбойной зоне. Значительное преобладание дисковидных и изометричных форм обломков подтверждает активную переработку материала, а также может свидетельствовать об удалённости от областей сноса. Таким образом, можно предположить расширение зоны активной гидродинамики.

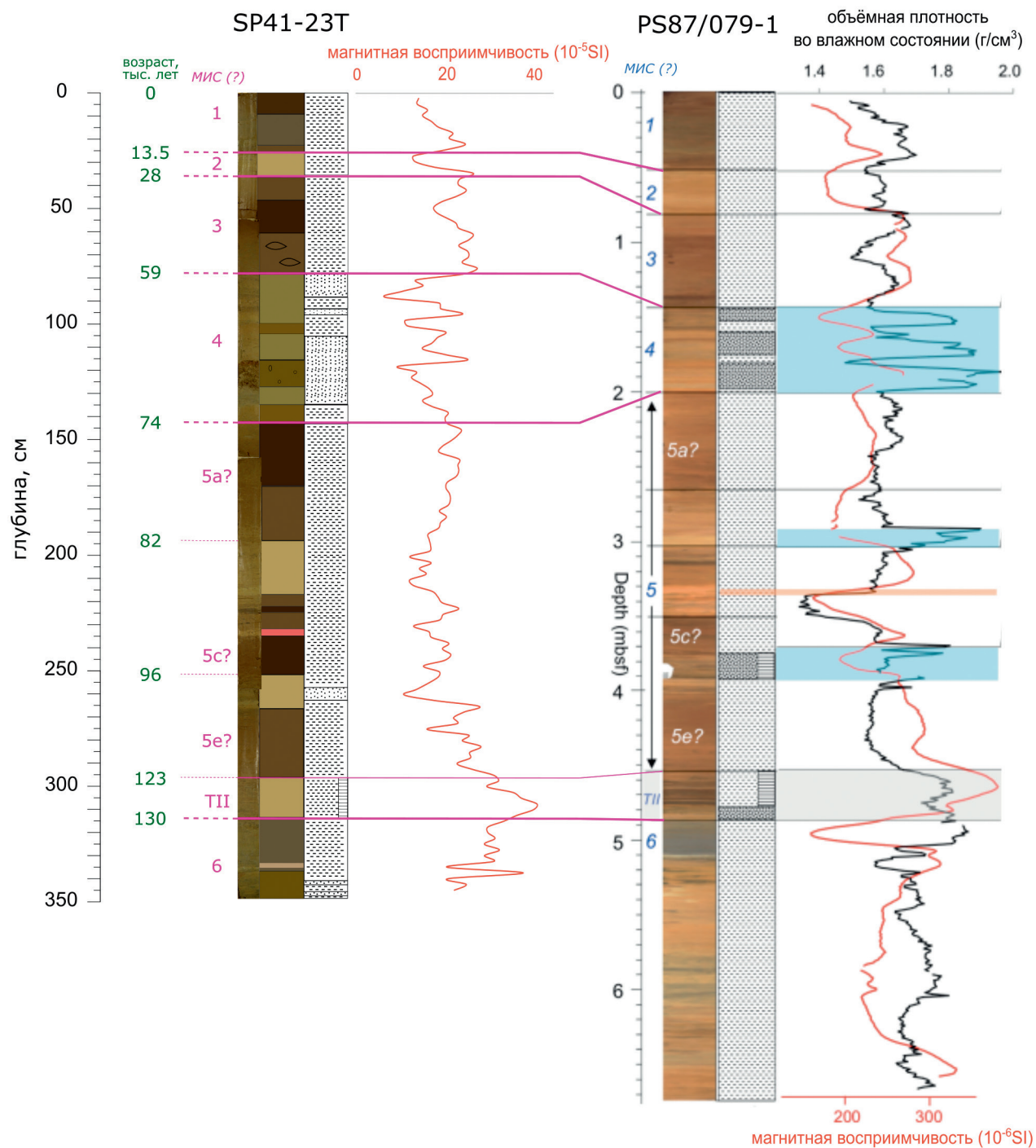


Рис. 5. Корреляция колонки 23Т с колонкой PS87/079-1 [13] по литологическим характеристикам и магнитной восприимчивости, границы между МИС показаны розовыми линиями. Горизонтальной штриховкой показан алевропит, точками – осадки с повышенным содержанием песка, горизонтальными полосами – слоистая текстура.

Данные о вещественном и количественном составе, а также о форме и окатанности обломков позволяют восстановить особенности обстановок осадконакопления в регионе (табл. 2). Высокий привнос обломков в конце МИС 2 – начале МИС 1 (“тёмно-серо-коричневый” слой)

отражает активное таяние здесь айсбергов и морского льда, что свидетельствует о деструкции ледников в то время — это совпадает с общими реконструкциями ледяного покрова в СЛО [14]. Доломит является преобладающим компонентом, что подтверждает доминирующее влияние

Таблица 2. Осреднённые характеристики ДКМ и интерпретация палеообстановки

Слой	Содержание ДКМ	Окатанность	Породы	Обстановка
“Коричневый-1”	Минимальное	Полуокатанные	1. Магм. основные и средние 2. Карбонатные 3. Терр. осадочные, ЖМО, магм. кислые	МИС 1 Межледниковье (Interglacial), материал из Евразии, с морским льдом
“Серо-коричневый”	Низкое	Угловатые	1. Карбонатные 2. Магм. средние, терр. осадочные	МИС 1 Межледниковье (Interglacial) Материал из КАА и Евразии
“Тёмно-серо-коричневый”	Максимальное	Угловатые	1. Карбонатные 2. Песчаник 3. Магм. средние 4. Кварцит, кварц 5. Магм. основные, терр. осадочные, крист. сланец	МИС 2/1 Пик дегляциации (Deglacial), разгрузки льда, переход от ледниковья к межледниковью Материал из КАА и Евразии, с айсбергами и морским льдом
“Бежевый”	Среднее	Угловатые	1. Карбонатные 2. Алевролит 3. Кварцит 4. Крист. сланец 5. Метаосадочные, филлит	МИС 2 Ледниковье (Glacial) Материал из КАА
“Коричневый-2”	Среднее	Угловатые	1. Карбонатные 2. Магм. основные, метаосадочные 3. Алевролит, аргиллит, кварцит, крист. сланец	МИС 3 Межледниковье (Interglacial), материал из КАА и Евразии

материала, приносимого с островов Канадского Арктического Архипелага (КАА) [5]. Затем транспорт грубозернистого материала из дальних областей сноса падает, о чём говорит малое количество обломков и обеднённый вещественный состав. Материал с КАА по-прежнему поступает, однако доля магматических средних и кислых пород растёт, отражая вклад материала со стороны Евразии. В голоцене материал из Евразии принесённый, вероятно, морским льдом, уже начинает доминировать, что подтверждается как минимально низкой концентрацией обломков, так и наилучшей окатанностью, и преобладанием магматических пород в составе. Общее количество материала, пришедшего со стоком рек западной части Евразии, также увеличилось в последнее время, что привело к ускоренному осадконакоплению на западном склоне хребта.

Резкой смены качественного состава вдоль профиля через хребет не происходит — значит,

материал приходит в эту зону из множества разных источников, и резкая граница между двумя крупными системами ледового дрейфа явно не наблюдается. Высокое содержание обломков магматических пород, не отмеченное в исследованиях материала из центральной части хребта [10, 12], обусловлено более активным вкладом материала из Евразии по причине близости к ней.

Данные о составе и форме крупных обломков в колонках с хр. Ломоносова использованы для изучения изменений палеообстановки. При изучении распределения ДКМ в СЛО даже в коротких разрезах следует учитывать возраст отложений в силу низкой скорости осадконакопления. В данном исследовании разность в содержании обломков на профиле указывает на более высокую скорость осадконакопления на западном склоне после пика дегляциации, а не на разность темпов привноса материала со льдом.

Смена состава с карбонатных на магматические породы и улучшение степени окатанности со временем указывают на ослабление ледового покрова и установление гемипелагического осадконакопления.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят капитана и команду ЛСП “Северный Полюс”, а также учёных на борту, в особенности О.Л. Зимину и Р.Б. Самсонова за просеивание материала.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы утверждают об отсутствии у них конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крылов А. А., Малышев С. А., Богин В. А., Захаров В. Ю., Гусев Е. А., Макаров А. С. Особенности распределения псефитового материала в верхне-четвертичных отложениях северной части Баренцева моря // Проблемы Арктики и Антарктики. 2020. Т. 66. № 3. С. 381–395.
2. Атлас текстур и структур осадочных горных пород Т. 1 / Ред. А.В. Хабаков. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 578 с.
3. Aagaard K., Swift J. H., Carmack E. C. Thermohaline circulation in the Arctic Mediterranean seas // Journal of Geophysical Research, 1985. № 90 (C3). P. 4833–4846.
4. Bischof J. F. The decay of the Barents ice sheet as documented in nordic seas ice-rafted debris // Marine Geology. 1994. V. 117. № 1–4. P. 35–55.
5. Darby D. A., Bischof J. F., Spielhagen R. F., Marshall S. A., Herman S. W. Arctic ice export events and their potential impact on global climate during the late Pleistocene // Paleoceanography. 2002. V. 17. № 2.
6. Krylov A. A., Matthiessen J., Nam S.-I. et al. Origin of the coarse-grained (> 1 cm) clasts from the Mendelev Ridge area (Central Arctic Ocean) // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65. № 4. С. 795–809.
7. Lisitzin A. P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean. Recent and past. Heidelberg; Berlin: Springer-Verlag, 2002. 564 pp.
8. Mueller C. Rekonstruktion der Palaeo-Umweltbedingungen am Laptev-See-Kontinentalrand während der beiden letzten Glazial-/Interglazial-Zyklen anhand sedimentologischer und mineralogischer Untersuchungen // Report on Polar Research. 1999. V. 328. 146 pp.
9. Munsell Color (Firm). Munsell Soil Color Charts: with Genuine Munsell Color Chips. Grand Rapids, MI: Munsell Color, 2009.
10. Phillips R. L., Grantz A. Regional variations in provenance and abundance of ice-rafted clasts in Arctic Ocean sediments: implications for the configuration of late Quaternary oceanic and atmospheric circulation in the Arctic // Marine Geology. 2001. V. 172. P. 91–115.
11. Spielhagen R. F., Baumann K.-H., Erlenkeuser H. et al. Arctic Ocean deep-sea record of Northern Eurasian ice sheet history // Quaternary Science Review. 2004. V. 23. № 11–13. P. 1455–1483.
12. Spielhagen R. F., Bonani G., Eisenhauer et al. Arctic Ocean evidence for Late Quaternary initiation of northern Eurasian ice sheets // Geology. 1997. V. 25. P. 783–786.
13. The Expedition PS87 of the Research Vessel Polarstern to the Arctic Ocean in 2014 // Reports on Polar and Marine Research. Stein R. (Ed.). 2015. V. 688. 273 pp.
14. Stein R., Fahl K., Müller J. Proxy reconstruction of Arctic Ocean sea ice history – From IRD to IP25 // Polarforschung. 2012. V. 82. P. 37–71.
15. Wadell H. Volume, shape, and roundness of rock particles // The Journal of Geology. 1932. V. 40. P. 443–451.
16. Zingg T. Beitrag zur schotteranalyse // Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen. 1935. V. 15. P. 39–140.

**CONTENT AND COMPOSITION OF ROCK DEBRIS
AT THE LOMONOSOV RIDGE (83° N):
INDICATION OF PALAEOENVIRONMENTAL CHANGES**

**E. A. Popova^{a,b,#}, V. A. Bogin^{a,b}, S. A. Malyshev^{a,b}, K. V. Filchuk^b, A. S. Makarov^b,
Academician of the RAS V. D. Kaminsky^a**

^a*The All-Russia Scientific Research Institute for Geology and Mineral Resources of the Ocean ("VNIIOkeangeologia"),
Saint Petersburg, Russian Federation*

^b*Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), Saint Petersburg, Russian Federation*

[#]*E-mail: lena-popova-l@mail.ru*

The results of studying the quantitative, material, and morphometric composition of rock debris in sediments sampled by a box-corer on the Lomonosov Ridge (83° N), Arctic Ocean, during the Severny Polyus 41 expedition (AARI) are presented. Debris ≥ 1 cm was sampled from each lithological layer according to the description. The age model was created by lithostratigraphic correlation with previously dated cores. The content of debris on the eastern slope and the summit is significantly higher than on the western slope, which is explained by the higher sedimentation rate on the western slope after the deglaciation peak. The carbonate to igneous shift in rock composition and the increase in roundness with time indicate a higher input of Eurasian material in MIS 1.

Keywords: ice-rafted debris, Late Pleistocene, Arctic Ocean, Lomonosov Ridge