

УДК 551.351

## ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ГУБЫ БУОР-ХАЯ

© 2020 г. А. С. Ульяновцев<sup>1, \*</sup>, С. Ю. Братская<sup>2, \*\*</sup>, Ю. О. Привар<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия

\*e-mail: uleg85@gmail.com

\*\*e-mail: s.bratskaya@gmail.com

Поступила в редакцию 20.10.2019 г.

После доработки 26.11.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

В статье представлены результаты гранулометрического анализа донных отложений и подводных многолетнемерзлых пород из трех буровых скважин, вскрывших голоцен–плейстоценовую толщу в губе Буор-Хая. Выявлена выраженная литолого-фациальная дифференциация исследованных терригенных толщ, большое разнообразие гранулометрических и вещественно-генетических типов отложений, накапливавшихся в чередующихся природных обстановках. Основная масса вскрытых бурением многолетнемерзлых и талых дисперсных отложений представлена хорошо окатанными и сортированными аллювиальными песками, накопление которых было неразрывно связано с динамикой речного стока, склоновых процессов, термоэрозии и абразии берегов. Установлено, что более тонкие фракции отложений по сравнению с песками значительно хуже сортированы. По совокупности полученных данных подтверждена преимущественно обломочная (кластическая) природа осадочного материала и его континентальный генезис.

**Ключевые слова:** Арктика, шельф, донные осадки, подводная мерзлота, колонковое бурение, гранулометрия

**DOI:** 10.31857/S0030157420030107

### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдаемые за последние десятилетия изменения среды восточно-арктического шельфа усиливают интерес к изучению свойств и характеристик компонентов этой сложной природной системы в условиях деградации многолетней мерзлоты, разрушения газовых гидратов и массивной дегазации дна, береговой абразии и термоэрозии, ледовой экзарации дна, мобилизации древнего органического углерода и связанных с ней потенциальных климатических рисков [2, 5–7, 9, 27, 28, 37, 46–51, 58]. Четвертичный морфолитогенез восточно-арктического шельфа характеризуется рядом особенностей, в том числе выраженностью флювиальных, флювиогляциальных и криогенных процессов, сформировавших мощные аккумулятивные толщи, характерный криогенный ландшафт и обширную криолитозону, в которой заключены большие массы реакционно способного органического углерода [11, 46, 47, 55, 59]. Единого представления о генезисе и возрасте криогенных отложений едомной свиты и ледового комплекса, распространенных в

прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых и частично затопленных в результате морской трансгрессии, не сформулировано, однако наиболее вероятен их голоцен–плейстоценовый возраст и полигенное происхождение с преобладанием терригенной компоненты [15, 16, 35, 42–45, 53, 58].

Гранулометрический состав донных отложений является важным инструментом для понимания особенностей седиментационных процессов в разных климатических обстановках, так как позволяет судить о гидродинамических и морфометрических условиях осаждения материала, его генезисе и инженерно-геологических свойствах, а также проницаемости для флюидов и физическом состоянии толщ [13, 14]. На фоне продолжающегося таяния субаквальных многолетнемерзлых отложений на шельфе Арктики [например, 28, 47] оценка их гранулометрического состава как фактора темпа деградации подводной мерзлоты и индикатора генезиса осадочного материала является актуальной задачей. Целью работы было выявление основных закономерностей формирования гранулометриче-

**Таблица 1.** Характеристики пробуренных скважин. Глубина воды приводится с учетом мощности льда (в скобках) от ледовой поверхности до дна. Глубина скважины приводится от поверхности дна

Скважина	Координаты °с.ш.; °в.д.	Глубина воды (толщина льда), м	Глубина скважины, м	Граница мерзлоты, м
1D-14	71.755; 129.397	3.1 (1.9)	38.2	12
3D-14	71.619; 129.916	2.7 (1.2)	17.5	10
1D-15	71.672; 130.137	9.8 (1.6)	33.2	Не пройдена

ского состава многолетнемерзлых и талых отложений в мелководной части моря Лаптевых. Задачи: установить преобладающие гранулометрические и вещественно-генетические типы осадочного материала, оценить его природу и преобладающий генезис.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследования послужили керны донных отложений трех станций, полученных в 2014–2015 гг. при колонковом бурении в губе Буор-Хая [18–21]. Скважины были пробурены с припайного льда в Ивашкиной лагуне полуострова Быковский (1D-14), вблизи северного мыса о. Муостах (3D-14) и севернее о. Муостах (1D-15) (табл. 1). Для анализа использовали пробы естественной влажности. Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции в соответствии с международным стандартом ISO 13320:2009. Песчаную и алеврито-пелитовую фракцию разделяли мокрым рассевом проб на ситах с размером ячейки 0.1 мм. Разделенные таким образом две фракции высушивались до постоянной массы и взвешивались. Процентное содержание песчаной и алеврито-пелитовой фракции в пробе рассчитывалось весовым способом с учетом естественной влажности проб, определение которой проводилось на анализаторе Shimadzu MOC-120H. Определение процентного содержания алевритовой и пелитовой фракций проводили после отсева на анализаторе частиц Mastersizer 2000 (Malvern, Великобритания) с использованием жидкостного модуля диспергирования Hydro 2000S при постоянном перемешивании (2000 об./мин) и ультразвуковом воздействии. Время экспозиции пробы – 30 с, частота сканирования образца – 2500 Гц, дисперсант и фоновая жидкость – вода Milli-Q. Каждая проба анализировалась трижды, результаты усреднялись. Доля фракции 0.063–0.1 мм из результатов метода лазерной дифракции вычиталась в пользу песчаной фракции.

Оценка гранулометрических характеристик отложений состояла в статистической обработке результатов, расчете массового и численного содержания гранулометрических фракций. Для ряда проб колонки 1D-15 методом лазерной дифракции была проанализирована препаративно выделенная песчаная фракция с целью оценки степени сортировки песков и их дисперсности. Для отображения процентного вклада гранулометрических фракций в работе использована международная двоичная логарифмическая классификация: песок (>63 мкм), алеврит (2–63 мкм), пелит (<2 мкм). В алевритовой фракции были выделены две подгруппы – тонкий алеврит (2–10 мкм) и лесс (10–63 мкм), поскольку массовое содержание и состав частиц лессовой размерности в криогенных отложениях информативны как индикатор их генезиса [15, 53]. Для объективной оценки картины размерного распределения частиц исследованных отложений в работе были использованы расчетные статистические параметры, характеризующие совокупность частиц в пробе (табл. 2). Коэффициент сортировки ( $S_o$ ) характеризует степень однообразия совокупности частиц в пробе. Значения  $S_o$ , близкие к 1, свойственны хорошо сортированным осадкам, значения  $S_o$  между 1 и 2 – умеренно сортированным отложениям, значения более 2 свидетельствуют о низкой степени сортировки отложений. Средний диаметр ( $M_{Z1}$ ) дает общее представление о средней размерности частиц и рассчитывается из трех процентилей ( $p_{16}$ ,  $p_{50}$  и  $p_{84}$ ). Для сравнения нами был предложен расчет среднего диаметра ( $M_{Z2}$ ) на основе пяти процентилей ( $p_5$ ,  $p_{16}$ ,  $p_{50}$ ,  $p_{84}$  и  $p_{95}$ ), учитывающих “концевые” фракции частиц. Стандартное отклонение ( $\sigma$ ) также характеризует степень сортировки частиц в пробе. Величина  $\sigma$ , менее 1 характеризует хорошую сортировку отложений, значения  $\sigma$ , более 1 свойственны для плохо сортированных отложений. Величина асимметрии ( $Sk_f$ ) является характеристикой симметричности распределения частиц.

**Таблица 2.** Перечень статистических параметров гранулометрического состава

Параметр	Расчетная формула	Ссылка
Средний диаметр	$M_{Z1} = \frac{p16 + p50 + p84}{3}$	[26]
Средний диаметр	$M_{Z2} = \frac{p5 + p16 + p50 + p84 + p95}{5}$	Настоящая работа
Коэффициент сортировки	$S_o = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}}$	[14]
Стандартное отклонение	$\sigma_I = \frac{\phi84 - \phi16}{4} + \frac{\phi95 - \phi5}{6.6}$	[26]
Величина асимметрии	$Sk_I = \frac{\phi16 + \phi84 - 2\phi50}{2(\phi84 - \phi16)} + \frac{\phi5 + \phi95 - 2\phi50}{2(\phi95 - \phi5)}$	[26]
Величина эксцесса	$K_G = \frac{\phi95 - \phi5}{2.44(\phi75 - \phi25)}$	[26]

Примечание.  $p$  — соответствующий процентиль распределения частиц каждой пробы, рассчитанный через мм;  $Q_1$  и  $Q_3$  — первый и третий квартили массового распределения частиц в пробе, рассчитанные через мм;  $\phi$  — соответствующий процентиль распределения частиц каждой пробы, рассчитанный через единицы “фи” по [31].

Если распределение симметрично, то его  $Sk_I$  равно нулю. В случае асимметричной кривой распределения величина  $Sk_I$  отклоняется от нуля к +1 или -1 в зависимости от преобладания тонких или крупных фракций соответственно. Величина эксцесса ( $K_G$ ) выявляет наличие пиков в распределении частиц и используется для оценки сортировки выделяющихся (пиковых) групп размерных фракций. Для распределения без выраженных пиков значение  $K_G$  близко к 1 и возрастает с появлением выраженных вторичных максимумов. Для статистических расчетов использованы результаты дифракционного анализа проб, отделенных от песка, а также препаративно выделенных песков.

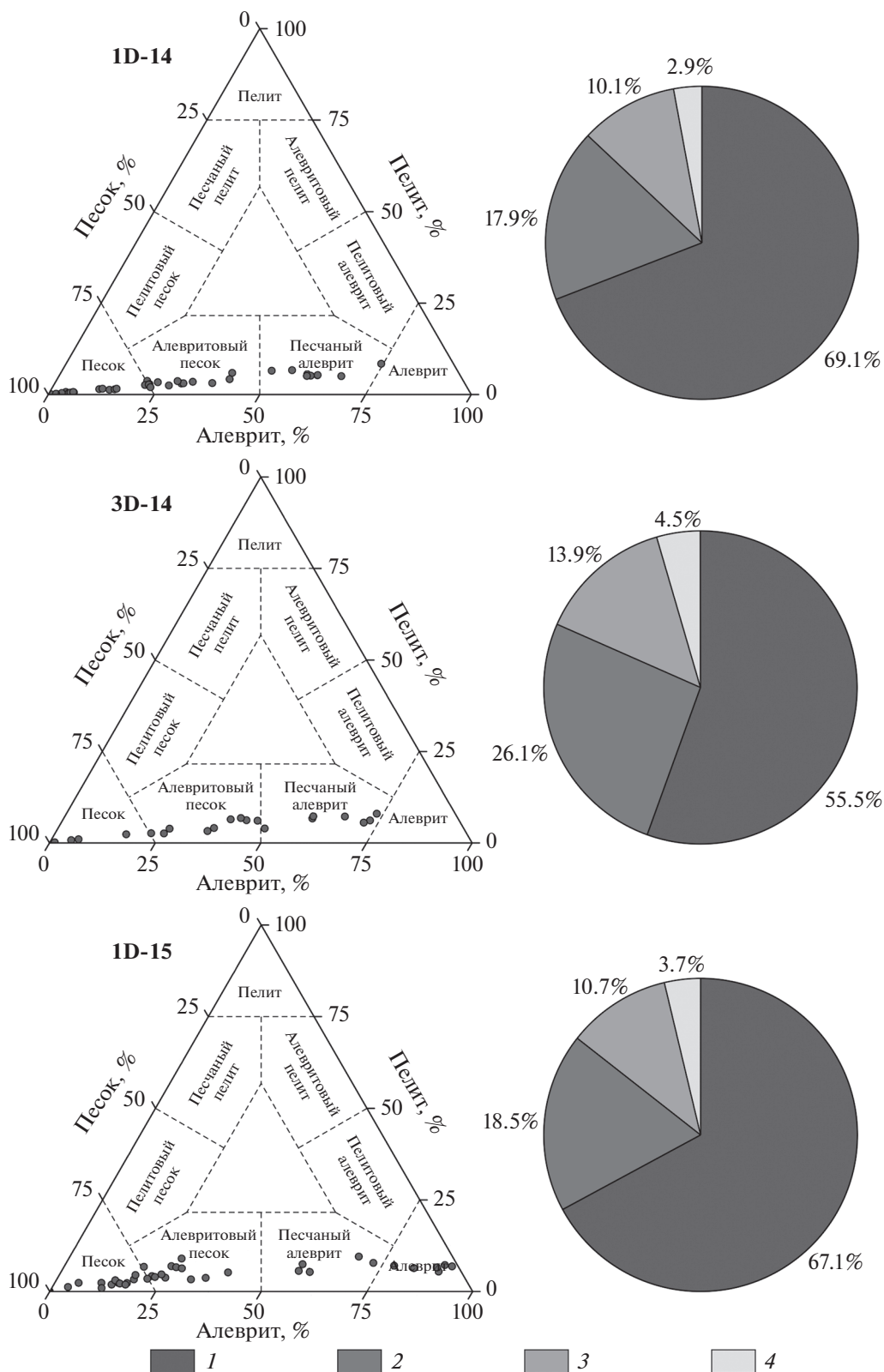
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Современный рельеф и береговая зона Быковского полуострова сформировались в результате термоэрозии, термокарста и трансгрессии моря [25, 30, 33, 38, 42, 44, 52]. Лагуна Ивашкина представляет собой затопленную морской водой термокарстовую котловину, формирование которой началось на границе голоцена и плейстоцена [35, 39]. Остров Муостах, расположенный юго-восточнее полуострова, является исчезающим останцем той же равнины и состоит преимущественно из отложений ледового комплекса позднеплейстоценового возраста [28, 42]. Широкое распространение высокольдистых отложений ледового комплекса в прибрежно-шельфовой зоне моря Лаптевых обуславливает значительный вклад термоэрозии

в поставку осадочного материала и трансформацию осадочных толщ.

Гранулометрические характеристики шельфовых донных отложений зависят от многих факторов, ведущими из которых являются состав поступающего в зону седиментации осадочного вещества, рельеф, тектоническая активность, колебания климата, циркуляция атмосферы, динамика водных масс [3, 8, 13, 14]. В рассматриваемом районе биопродуктивность вод имеет подчиненное значение, но зональность природных процессов выражена особым образом [15, 36]. Перечисленные факторы в совокупности привели к формированию сложной картины гранулометрического состава отложений, расшифровка которой стала возможной с учетом динамики седиментации, абразии береговой зоны и разнообразием обстановок осадконакопления.

Гранулометрический анализ выявил весьма разнообразный и неоднородный состав отложений исследованных буровых колонок, большинство которых представлено кварцевыми и аркозовыми песками различной зернистости с вариациями содержания алеврита и пелита (рис. 1). Присутствие большого количества аллювиальных песков с включениями древесных остатков является характерной чертой перигляциального ландшафта прибрежно-шельфовой зоны моря Лаптевых [15, 19, 41]. Профили 1D-14 и 1D-15 характеризуются нисходящим увеличением содержания песка, что является предпосылкой для интенсификации поступления морской воды к мерзлым толщам и усилению солевого эффекта



**Рис. 1.** Гранулометрический состав исследованных отложений. Слева представлены треугольные диаграммы гранулометрического состава, справа – круговые диаграммы среднего содержания гранулометрических фракций в ядрах исследованных отложений. 1 – фракция >63 мкм; 2 – фракция 10–63 мкм; 3 – фракция 2–10 мкм; 4 – фракция <2 мкм.

таяния многолетнемерзлых пород, связанными с улучшением дренажных свойств осадочных пород [20]. Отложения колонки 3D-14 в свою очередь отличаются заметным обогащением крупно-алевритовой фракцией и меньшим содержанием песка. Высокое содержание лессовой фракции в криогенных отложениях, характерное для аридного климата, указывает на высокую долю поставки эолового осадочного материала на стадиях оледенений [15, 41, 53]. Отдельные мерзлые сегменты колонки, представленные мелким песком и лессом, являются плотно упакованными остатками ледового комплекса. Тем не менее, неравномерное распределение гранулометрических фракций отражает также криогенную трансформацию осадочных толщ (криотурбацию и термокарст), связанную со сменой географических обстановок морфолитогенеза в результате колебаний климата.

Анализ отделенных от песков фракций показал их значительную неоднородность по гранулометрическому составу, о чем свидетельствуют рассчитанные параметры (табл. 3–5). Размерные спектры массового распределения частиц весьма разнообразны по форме и заметно отличаются друг от друга (рис. 2). Значения  $S_0$  и  $\sigma_1$  в большинстве проб превышают 2 и 1.5 соответственно, что отражает низкую сортировку. Величина  $Sk_1$  имеет отрицательные значения, свидетельствуя о преобладании в просеянных пробах более крупных фракций, в том числе лессовой размерности. Незначительные колебания величины  $K_G$  относительно 1 отражают модальность распределения частиц в пробе и позволяют сделать вывод об отсутствии вторичных выраженных максимумов на размерных спектрах. Средний диаметр  $M_{22}$  во всех пробах превышает  $M_{21}$  и отражает небольшой вклад крупных “концевых” фракций, не учтенных при расчете  $M_{21}$ . Для горизонтов 190 и 1914 см скважины 1D-14 выявлена значительная разница между  $M_{21}$  и  $M_{22}$  (24.6 против 122 мкм и 35.2 против 155 мкм соответственно). Эта разница связана с наличием “концевого” вторичного максимума, учитываемого при расчете  $M_{22}$ , но на долю которого приходится более 5% частиц. В этом случае процентиль  $p_{95}$  соответствует гораздо большему диаметру, что отражается в разнице  $M_{21}$  и  $M_{22}$ .

Выявленная в значительной мере неоднородная картина распределения гранулометрических характеристик отделенных от песка фракций указывает на их обломочную (кластическую) природу. При этом пути поступления осадочного материала, среди которых доминировали пресноводный сток, термоэрозионные и флювиогляциальные

потоки, были весьма неоднородны в пространстве и времени, что нашло отражение в литологическом составе исследованных колонок. На дифференциальных кривых просеянных проб встречаются частицы песчаной размерности (горизонты 190, 296, 1901 и 1914 см скважины 1D-14). Их попадание в более мелкую фракцию связано с неправильностью формы, когда несферические частицы, например, цилиндрические или эллипсоидные, проходят сквозь ячейки сита. Поскольку метод лазерной дифракции оперирует эквивалентными сферами, частицы любой неправильной формы математически преобразуются в сферы. При достаточно большой длине частиц их эквивалентный диаметр при расчетах возрастает, что отражается на размерных спектрах.

По сравнению с тонкодисперсными фракциями препаративно выделенные пески показали схожие между собой дифференциальные распределения частиц по размерам. Статистические коэффициенты (табл. 6) подтверждают их более высокую степень сортировки ( $S_0$  и  $\sigma_1$  не превышают 1.5 и 1 соответственно) и мономодальность распределения частиц ( $Sk_1$  близко к 0). Величина эксцесса ( $K_G$  около 1) указывает на близкие к нормальным распределения частиц. Исключением является образец 3146, характеризующийся максимальными величинами  $K_G$  и  $Sk_1$ , в то же время не выделяющийся по другим расчетным параметрам. Это объясняется присутствием второго максимума в правой части распределения, соответствующего более крупным фракциям. Стоит отметить, что наибольшая разница между средними диаметрами ( $M_{21}$  и  $M_{22}$ ) выявлена именно для этого образца (203 и 410 мкм соответственно). Средний диаметр  $M_{22}$ , предложенный в настоящей работе, учитывает выпадающие из расчета  $M_{21}$  “концевые” фракции, поэтому применение  $M_{22}$  позволяет получить более адекватную информацию о среднем размере частиц.

Сортировка отложений, в том числе крупнозернистых песков, также связана с аэродинамическим фактором, играющим значительную роль в эоловой поставке и распространении кластического материала на севере Якутии [15, 32]. Посредством ветровой сальтации достаточно крупные пески отсортировываются от мелких фракций, создавая отдельные скопления на заснеженной поверхности. При этом мощные заструги, формирующиеся на ледовой поверхности, играют роль направляющих, перераспределяя выносимый ветром осадочный материал. На рис. 3 представлены песчаные наносы на заснеженной поверхности морского льда, заснятые недалеко от полуострова Быковский. Отчетливо видны застру-

Таблица 3. Статистические гранулометрические параметры фракции &lt;0.1 мкм отложений скважины 1D-14

Горизонт, см	$M_{Z1}$ , мкм	$M_{Z2}$ , мкм	$S_o$	$\sigma_I$	$Sk_I$	$K_G$
0	11.81	16.22	2.23	1.62	-0.07	0.92
55	17.76	23.57	2.65	1.86	-0.18	0.85
96	24.33	29.13	2.33	1.80	-0.41	0.97
190	24.65	121.6	2.63	2.40	-0.09	1.31
296	19.76	29.26	2.45	1.85	-0.21	0.97
415	16.02	19.98	2.40	1.76	-0.32	0.91
448	13.82	17.38	2.49	1.71	-0.25	0.84
496	15.25	19.60	2.46	1.75	-0.23	0.88
546	14.35	18.71	2.49	1.79	-0.25	0.88
878	36.42	45.45	3.51	2.25	-0.39	0.77
1039	31.61	40.09	2.50	1.91	-0.31	0.96
1142	19.24	24.70	2.31	1.77	-0.23	0.98
1200	22.75	32.52	2.41	1.87	-0.10	0.98
1218	27.69	35.11	2.72	1.95	-0.30	0.87
1358	20.44	33.18	2.77	2.14	0.01	0.94
1391	16.90	24.54	2.63	1.90	0.03	0.88
1471	16.24	24.22	2.60	1.94	-0.07	0.92
1486	17.77	22.82	2.17	1.69	-0.22	1.03
1631	23.46	29.99	2.04	1.67	-0.30	1.14
1706	35.04	45.11	3.15	2.13	-0.24	0.81
1743	20.90	26.81	2.55	1.85	-0.28	0.89
1796	21.10	26.84	2.59	1.89	-0.32	0.89
1901	33.80	52.22	2.79	2.07	-0.08	0.92
1914	35.20	155.2	3.09	2.44	0.03	1.11
2059	33.76	40.70	2.51	1.89	-0.38	0.93
2087	22.28	29.15	2.75	1.99	-0.29	0.88
2119	24.30	30.64	2.57	1.82	-0.25	0.86
2366	62.36	68.29	2.38	1.89	-0.60	1.01
2460	34.51	43.28	3.23	2.18	-0.34	0.81
2701	27.85	36.68	2.66	1.99	-0.27	0.93
3154	23.31	30.30	2.66	1.93	-0.23	0.89
3313	13.76	19.41	2.16	1.68	-0.18	1.04
3447	34.52	42.30	2.50	1.92	-0.38	0.96
3597	34.87	42.63	2.53	1.89	-0.34	0.94
3745	27.32	35.35	2.80	2.00	-0.27	0.87
3782	21.53	28.30	2.46	1.80	-0.19	0.91

**Таблица 4.** Статистические гранулометрические параметры фракции <0.1 мкм отложений скважины 3D-14

Горизонт, см	$M_{Z1}$ , мкм	$M_{Z2}$ , мкм	$S_o$	$\sigma_I$	$Sk_I$	$K_G$
0	17.87	25.27	2.59	1.85	-0.05	0.88
155	22.71	27.56	2.25	1.72	-0.36	0.98
310	10.25	16.35	2.10	1.69	-0.04	1.09
402	23.14	30.35	2.42	1.83	-0.26	0.95
422	20.16	27.04	2.48	1.83	-0.20	0.92
845	16.43	25.84	2.55	1.93	0.00	0.94
896	17.32	24.12	2.51	1.84	-0.13	0.91
1057	33.77	40.92	2.66	2.06	-0.42	0.95
1080	14.59	20.40	2.62	1.84	-0.08	0.85
1170	29.19	36.44	2.60	1.96	-0.34	0.93
1218	30.75	35.90	2.70	1.96	-0.49	0.88
1249	21.43	26.02	2.09	1.67	-0.37	1.08
1334	48.88	54.10	2.24	1.94	-0.59	1.11
1414	27.15	32.69	2.82	1.98	-0.43	0.84
1450	18.50	26.97	2.97	2.04	-0.03	0.82
1471	11.62	16.67	2.26	1.76	-0.16	1.01
1475	9.12	14.21	2.01	1.58	-0.08	1.10
1499	31.32	40.25	3.05	2.14	-0.30	0.85
1540	15.98	21.12	2.29	1.73	-0.23	0.96
1740	18.73	23.35	2.10	1.62	-0.28	1.03

ги и скопления песка. Эти снежно-песчаные наносы сформировались в результате сильной метели, наблюдавшейся в районе п. Тикси перед началом экспедиционных работ (конец марта 2015 г.). Песок хорошо окатан и сортирован (рис. 4), размер частиц 1–2 мм, цвет темно-коричневый или черный, присущий местным аргиллитам.

Навеянные снежники представляют собой нивально-эоловые образования, в которых аккумулируется значительное количество обломочного материала, поступающего в дальнейшем в аккумулятивные ландшафты [32]. Крайне сухой криоаридный климат северной Якутии в последнюю ледниковую эпоху [1, 15] определял специфику перигляциального осадконакопления и способствовал накоплению больших ледовых масс среди субэаральных отложений прибрежно-шельфовой зоны моря Лаптевых. В современных климатических условиях снежники по-прежнему играют значимую роль в сезонном распространении, сортировке и поставке осадочного материала в донные осадки.

Поселок Тикси расположен в близости от Хараулахского хребта, являющего частью Верхоянского комплекса, сложенного преимущественно ар-

гиллитами, алевролитами и песчаниками верхнепалеозойского-нижнемезозойского возраста [4, 16]. На стадиях четвертичных оледенений, сопровождавшихся понижением уровня моря, обнажением шельфа и формированием нивального аридного климата [8, 15, 29, 36, 54], этот механизм играл весомую роль в поставке осадочного материала в заснеженные толщи, переходившие впоследствии в ледовый комплекс [11]. В периоды голоцен-плейстоценовых межледниковий отложения ледового комплекса оттаивали и проседали ввиду потери льдистости, формируя бесструктурные полигенные толщи таберальных образований, оказавшиеся впоследствии под водой в результате трансгрессии [11, 12, 34, 38]. Подобный цикл повторялся неоднократно на протяжении четвертичного времени, что отражено в сложном строении дна и составе отложений прибрежно-шельфовой зоны моря Лаптевых [15, 29, 36, 54]. Таким образом, в рассматриваемом районе Арктики климатически опосредованные ветровые процессы играют существенную роль как в поставке и распространении кластического материала, так и в его сортировке.

Следует отметить, что подобный механизм оказывает влияние на распространение и органи-

Таблица 5. Статистические гранулометрические параметры фракции &lt;0.1 мкм отложений скважины 1D-15

Горизонт, см	$M_{Z1}$ , мкм	$M_{Z2}$ , мкм	$S_o$	$\sigma_I$	$Sk_I$	$K_G$
0	21.24	24.12	1.84	1.46	-0.39	1.18
110	14.81	17.21	1.90	1.44	-0.33	1.09
210	18.48	24.36	2.42	1.80	-0.22	0.93
280	17.33	20.16	2.06	1.55	-0.37	1.02
321	12.93	15.82	2.04	1.46	-0.22	0.94
395	19.86	22.76	1.91	1.54	-0.41	1.15
510	17.83	20.37	1.97	1.58	-0.43	1.12
612	19.83	25.17	2.25	1.76	-0.32	1.01
675	16.32	20.11	2.45	1.79	-0.33	0.90
750	23.09	31.05	3.06	2.04	-0.18	0.79
794	18.15	23.43	2.40	1.78	-0.26	0.93
852	17.31	22.64	2.33	1.75	-0.23	0.95
1114	20.60	30.52	2.90	2.06	0.01	0.85
1195	25.00	34.34	3.05	2.07	-0.17	0.81
1249	28.83	37.21	2.86	2.07	-0.30	0.87
1284	25.48	35.08	3.36	2.21	-0.10	0.79
1347	53.65	60.07	2.88	2.16	-0.60	0.90
1424	19.65	31.00	4.12	2.51	0.17	0.74
1483	26.78	36.29	3.69	2.25	-0.09	0.73
1507	10.84	19.63	2.80	2.10	0.04	0.92
1548	26.48	35.96	3.56	2.23	-0.12	0.75
1624	60.62	64.99	2.24	1.96	-0.65	1.14
1662	21.68	31.62	2.92	2.13	-0.05	0.88
1697	19.79	28.45	3.58	2.20	-0.02	0.73
1726	10.46	14.58	2.49	1.80	-0.07	0.87
1800	11.56	18.62	2.68	2.00	0.09	0.89
1930	14.47	21.38	2.49	1.90	-0.10	0.95
2031	10.47	17.92	2.71	2.03	0.01	0.92
2093	25.25	33.14	2.86	2.03	-0.24	0.87
2170	13.35	19.81	2.54	1.88	-0.08	0.91
2210	13.98	22.50	2.99	2.13	-0.01	0.86
2254	9.71	15.99	2.70	2.00	-0.04	0.91
2321	22.47	32.21	4.23	2.37	0.03	0.68
2402	9.94	17.23	2.71	2.04	0.05	0.92
2469	9.84	17.24	2.75	2.04	0.04	0.91
2545	10.39	16.19	2.61	1.92	0.01	0.89
2604	10.10	17.70	2.63	2.01	0.01	0.94
2648	20.57	29.22	3.16	2.19	-0.17	0.83
2712	23.92	32.29	3.71	2.30	-0.21	0.74
2780	15.24	25.86	3.30	2.29	0.06	0.84
2929	7.89	14.36	2.61	1.94	0.09	0.92
3120	23.04	33.47	3.30	2.19	0.00	0.79
3146	10.27	17.80	2.71	2.03	0.08	0.92
3200	31.50	39.92	2.66	2.00	-0.31	0.92
3248	19.39	30.03	3.38	2.22	0.07	0.78
3304	12.11	16.20	2.32	1.74	-0.14	0.94

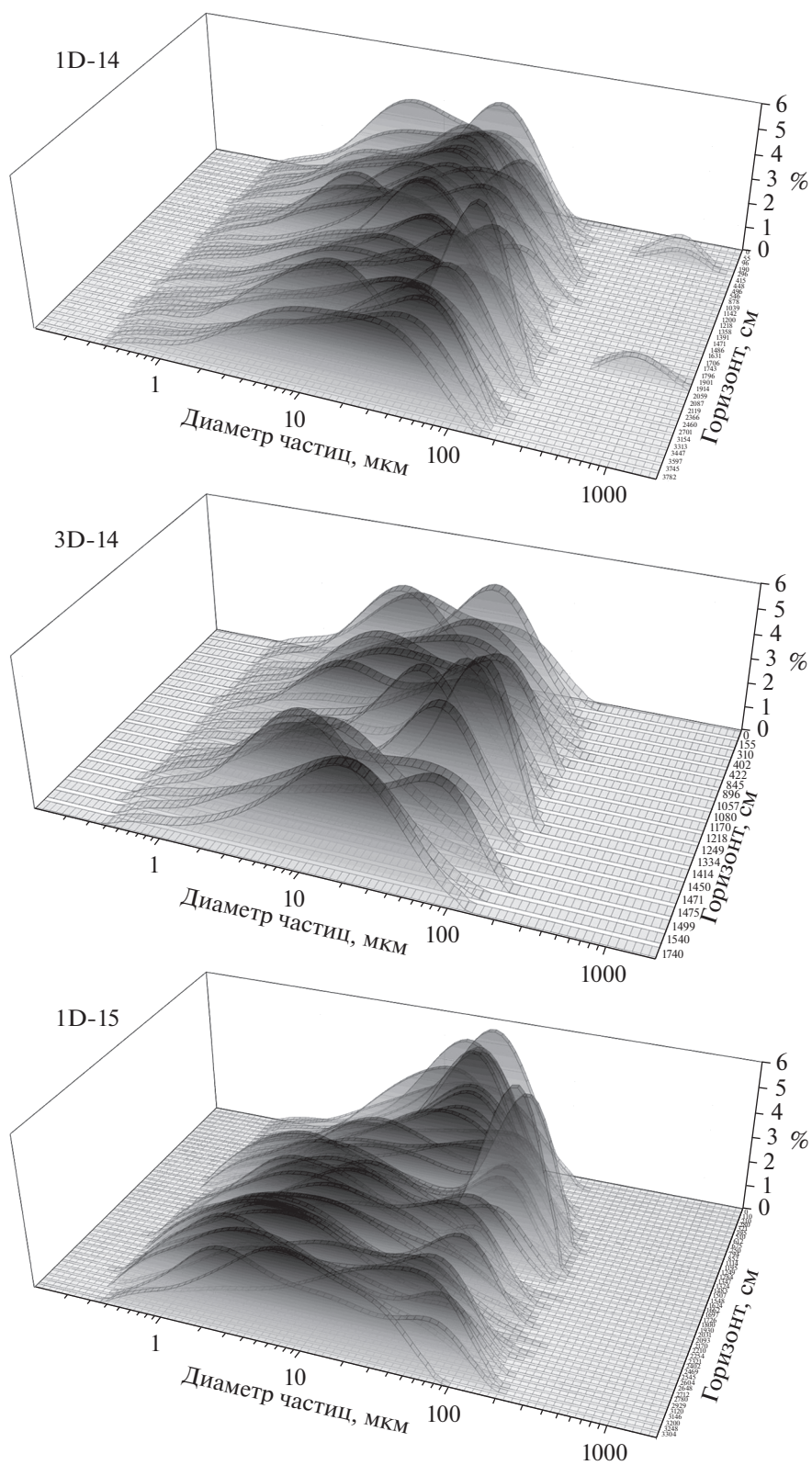


Рис. 2. Дифференциальные распределения частиц тоньше 0.1 мм в исследованных отложениях скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15.



**Рис. 3.** Песчаные наносы на заснеженной ледовой поверхности губы Буор-Хая (фото А.С. Ульянцева). На заднем плане виден характерный термоабразионный байджеяховый рельеф полуострова Быковский.

**Таблица 6.** Статистические гранулометрические параметры препаративно выделенной из отложений скважины 1D-15 фракции крупнее 0.1 мкм

Горизонт, см	$M_{Z1}$ , мкм	$M_{Z2}$ , мкм	$S_o$	$\sigma_I$	$Sk_I$	$K_G$
675	210.6	250.9	1.48	0.85	0.09	1.03
750	181.7	201.1	1.46	0.81	-0.04	1.01
852	237.4	297.4	1.69	1.10	0.09	0.97
1284	292.4	313.1	1.42	0.71	-0.05	0.93
1424	206.5	234.3	1.40	0.71	0.09	0.99
1548	165.8	178.8	1.33	0.59	0.04	0.97
1726	325.9	345.1	1.37	0.65	-0.05	0.94
2093	515.1	587.3	1.59	0.94	-0.02	0.93
2321	361.2	390.4	1.44	0.76	-0.07	0.97
2545	241.6	252.5	1.29	0.52	-0.01	0.94
2648	287.8	301.6	1.30	0.54	-0.02	0.94
2712	320.1	399.2	1.48	0.87	0.14	1.06
2780	367.4	391.4	1.41	0.71	-0.08	0.95
3146	203.2	410.3	1.43	1.04	0.17	1.70
3200	159.0	165.9	1.27	0.49	-0.01	0.95



**Рис. 4.** Микрофотография песка, отобранного с ледовой поверхности близ полуострова Быковский. Снимок получен с помощью стереомикроскопа Leica DVM6.

ческого вещества. В исследованном районе губы Буор-Хая на заснеженной ледовой поверхности в период экспедиций были обнаружены наносы мелких древесных и травянистых остатков, также формирующих локальные скопления. Следует учитывать, что обогащение отложений ледового комплекса органическим веществом, принесенным с суши, в периоды оледенений происходило именно по такому механизму. В пользу этого говорит преимущественно терригенное органическое вещество в криогенных отложениях прибрежной зоны Восточно-Арктического шельфа [15, 17, 22–24, 40, 53, 56, 57].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс полученных данных отражает сложную динамику приконтинентальных седиментационных процессов и изменений литологического состава моря Лаптевых в условиях четвертичных колебаний климата. Анализ гранулометрического состава выявил весьма сложную картину, не типичную для слабо литифицированных донных осадков Мирового океана. В составе исследованных отложений доминируют аллювиальные пески кварцевого и аркозового состава, накопление которых определялось в большей степени гидродинамическим режимом вод и динамикой термоэрозии. Как показали статистические гранулометрические параметры, пелитовые фракции в составе песков представлены в основном кластическим материалом, образованным в результате дробления песчаных фракций. Принимая во внимание многообразие факторов, определяющих гранулометрический состав исследованных отложений, можно говорить лишь о преобладании тех

или иных потоков осадочного материала, среди которых, безусловно, доминируют речной сток и термоэрозия.

Разнообразие выявленных литолого-фациальных характеристик и гранулометрических типов осадков, большинство из которых представлено перигляциальным аллювием, подтвердило пространственно-временную неоднородность четвертичного морфолитогенеза прибрежной зоны моря Лаптевых и полигенный состав криогенных отложений. Выявленные морфологические особенности частиц наряду со статистическими гранулометрическими параметрами указывают на континентальное происхождение исследованных отложений, ранее подтвержденное исследованиями концентраций и молекулярного состава органического вещества [10, 17, 19, 21, 22, 40, 53, 56, 57].

**Источник финансирования.** Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ (проект № 19-77-10044) в рамках темы госзадания ИО РАН № 0149-2019-0006. Методики пробоподготовки и анализа разработаны в рамках темы госзадания ИХ ДВО РАН № 0265-2019-0002.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зигерт К., Штаух Г., Лемкуль Ф. и др.* Развитие оледенения Верхоянского хребта и его предгорий в плейстоцене: результаты новых исследований // Региональная геология и металлогения. 2007. № 30–31. С. 222–228.
2. *Касымская М.В.* Субмаринные талики восточной части шельфа моря Лаптевых // Планета Земля. 2012. № 1 (7). С. 133–140.
3. *Кузнецов В.Г.* Литология. Основы общей (теоретической) литологии. М.: Научный мир, 2011. 360 с.

4. Куницкий В.В. Криолитология низовья Лены. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1989. 164 с.
5. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Дмитревский Н.Н. и др. О процессах газовыделения и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 2. С. 312–320.
6. Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Шахова Н.Е. и др. О механизмах деградации подводных многолетнемерзлых пород на восточном арктическом шельфе России // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 2. С. 185–188.
7. Никифоров С.Л., Лобковский Л.И., Дмитревский Н.Н. и др. Ожидаемые геолого-геоморфологические риски по трассе Северного морского пути // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 218–220.
8. Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л. Обстановки морфолитогеоза в прибрежной зоне Мирового океана. М.: Наука, 2007. 455 с.
9. Перльштейн Г.З., Сергеев Д.О., Типенко Г.С. и др. Углеводородные газы и криолитозона шельфа Арктики // Арктика: экология и экономика. 2015. Т. 18. № 2. С. 35–44.
10. Романкевич Е.А., Ветров А.А., Беляев Н.А. и др. Алканы в четвертичных отложениях моря Лаптевых // Докл. РАН. 2017. Т. 472. № 1. С. 72–75.
11. Романовский Н.Н. Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
12. Романовский Н.Н., Гаврилов А.В., Тумской В.Е. и др. Криолитозона Восточно-Сибирского арктического шельфа // Вестник МГУ. 2003. № 4. С. 51–56.
13. Свальный В.Н. Микроструктуры и текстуры глубоководных осадков. М.: ГЕОС, 2001. 192 с.
14. Свальный В.Н., Алексеева Т.Н. Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с.
15. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Кассенс Х. и др. М.: Изд-во МГУ, 2009. 608 с.
16. Слагода Е.А. Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень: Экспресс, 2004. 119 с.
17. Ульянцев А.С., Беляев Н.А., Братская С.Ю., Романкевич Е.А. Молекулярный состав лигнина как индикатор таяния подводных многолетнемерзлых отложений // Докл. РАН. 2018. Т. 482. № 6. С. 701–704.
18. Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Романкевич Е.А. и др. О гранулометрическом составе голоцен-плейстоценовых отложений моря Лаптевых (залив Буор-Хая) // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 2. С. 206–210.
19. Ульянцев А.С., Лобковский Л.И., Жаворонков А.В. и др. Проблемы изучения Арктического шельфа: опыт системных геолого-геохимических исследований в море Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55. № 6. С. 1016–1022.
20. Ульянцев А.С., Полякова Н.В., Романкевич Е.А. и др. Ионный состав поровой воды мелководных шельфовых моря Лаптевых // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 3. С. 329–335.
21. Ульянцев А.С., Романкевич Е.А., Братская С.Ю. и др. Характеристика четвертичного осадконакопления на шельфе моря Лаптевых по молекулярному составу n-алканов // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 5. С. 600–604.
22. Ульянцев А.С., Романкевич Е.А., Пересыпкин В.И. и др. Лигнин как индикатор среды осадконакопления на Арктическом шельфе // Докл. РАН. 2016. Т. 467. № 1. С. 75–80.
23. Холодов А.Л., Золотарева Б.Н., Ширшова Л.Т. Органическое вещество в основных мерзлотно-генетических типах четвертичных отложений полуострова Быковский: содержание и групповой состав гумуса // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 4. С. 29–34.
24. Чеверев В.Г., Видяпин И.Ю., Тумской В.Е. Состав и свойства отложений термокарстовых лагун Быковского полуострова // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 3. С. 44–50.
25. Charkin A.N., Dudarev O.V., Semiletov I.P. et al. Seasonal and interannual variability of sedimentation and organic matter distribution in the Buor-Khaya Gulf: the primary recipient of input from Lena River and coastal erosion in the southeast Laptev Sea // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 2581–2594.
26. Folk R.L., Ward W.C. Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters // Journal of sedimentary petrology. 1957. V. 27. P. 3–26.
27. Günther F., Overduin P.P., Sandakov A.V. et al. Short- and long-term thermo-erosion of ice-rich permafrost coasts in the Laptev Sea region // Biogeosciences. 2013. V. 10. P. 4297–4318.
28. Günther F., Overduin P.P., Yakshina I.A. et al. Observing Muostakh disappear: permafrost thaw subsidence and erosion of a ground-ice-rich island in response to arctic summer warming and sea ice reduction // The Cryosphere. 2015. V. 9. P. 151–178.
29. Hubberten H.W., Andreev A., Astakhov V.I. et al. The periglacial climate and environment in northern Eurasia during the last glaciation // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. P. 1333–1357.
30. Karlsson E. S., Charkin A., Dudarev O. et al. Carbon isotopes and lipid biomarker investigation of sources, transport and degradation of terrestrial organic matter in the Buor-Khaya Bay, SE Laptev Sea // Biogeosciences. 2011. V. 8. P. 1865–1879.
31. Krumbein W.C. Size frequency distributions of sediments // Journal of sedimentary petrology. 1934. V. 4. P. 65–77.
32. Kunitsky V.V., Schirrmeister L., Grosse G. et al. Snow Patches in Nival Landscapes and Their Role for the Ice Complex Formation in the Laptev Sea Coastal Lowlands // Polarforschung. 2002. V. 70. P. 53–67.
33. Lantuit H., Atkinson D., Overduin P.P. et al. Coastal erosion dynamics on the permafrost-dominated Bykovsky

- Peninsula, north Siberia, 1951–2006 // *Polar Research*. 2011. V. 30. P. 7341.
34. *Morgenstern A., Grosse G., Günther F. et al.* Spatial analyses of thermokarst lakes and basins in Yedoma landscapes of the Lena Delta // *The Cryosphere*. 2011. V. 5. P. 849–867.
  35. *Morgenstern A., Ulrich M., Günther F. et al.* Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study // *Geomorphology*. 2013. V. 201. P. 363–379.
  36. *Nikiforov S.* (Ed.) Seabed morphology of the Russian Arctic shelf. New York: Nova Science Publishers, 2010. 202 p.
  37. *Overduin P.P., Strzelecki M.C., Grigoriev M.N. et al.* Coastal changes in the Arctic // *Sedimentary Coastal Zones from High to Low Latitudes: Similarities and Differences* / Eds. Martini I.P., Wanless, H.R. Geological Society of London Special Publication, 2014. V. 388. P. 103–129.
  38. *Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V. et al.* Permafrost of the east Siberian Arctic shelf and coastal lowlands // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 1359–1369.
  39. *Romanovskii N.N., Hubberten H.-W., Gavrilov A.V. et al.* Thermokarst and land-ocean interactions, Laptev Sea Region, Russia // *Permafrost and Periglac. Process*. 2000. V. 11. P. 137–152.
  40. *Sanchez-Garcia L., Vonk J.E., Charkin A.N. et al.* Characterization of three regimes of collapsing Arctic Ice Complex deposits on the SE Laptev Sea coast using biomarkers and dual carbon isotopes // *Permafrost and Periglac. Process*. 2014. V. 25. P. 172–183.
  41. *Schirrmeister L., Grosse G., Schwamborn G. et al.* Late Quaternary History of the Accumulation Plain North of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): A Multidisciplinary Approach // *Polar Geography*. 2003. V. 27(4). P. 277–319.
  42. *Schirrmeister L., Kunitzky V., Grosse G. et al.* Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands – A review // *Quatern. Int.* 2011. V. 241. P. 3–25.
  43. *Schirrmeister L., Oezen D., Geyh M.A.* 230 Th/U dating of frozen peat, Bol'shoy Lyakhovsky Island (Northern Siberia) // *Quaternary Research*. 2002. V. 57. P. 253–258.
  44. *Schirrmeister L., Siebert C., Kunitzky V.V. et al.* Late Quaternary ice-rich permafrost sequences as a paleoenvironmental archive for the Laptev Sea Region in northern Siberia // *Int. J. Earth Sciences*. 2002. V. 91. P. 154–167.
  45. *Schirrmeister L., Siebert C., Kuznetsova T. et al.* Paleo-environmental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // *Quaternary International*. 2002. V. 89. P. 97–118.
  46. *Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G. et al.* Vulnerability of Permafrost Carbon to Climate Change: Implications for the Global Carbon Cycle // *BioScience*. 2008. V. 58(8). P. 701–714.
  47. *Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C. et al.* Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. V. 520. P. 171–179.
  48. *Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö. et al.* Acidification of East Siberian Arctic Shelf waters through addition of freshwater and terrestrial carbon // *Nature Geoscience*. 2016. V. 9. P. 361–365.
  49. *Semiletov I.P., Shakhova N. E., Pipko I.I. et al.* Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay of the Laptev Sea // *Biogeosciences*. 2013. V. 10. P. 5977–5996.
  50. *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I. et al.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Geoscience*. 2013. V. 7. P. 64–70.
  51. *Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V. et al.* The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice // *Phil. Trans. R. Soc. A*. 2015. V. 373. P. 20140451.
  52. *Siebert C., Schirrmeister L., Babiy O.* The sedimentological, mineralogical and geochemical composition of Late Pleistocene deposits from the Ice Complex on the Bykovsky Peninsula, Northern Siberia // *Polarforschung*. 2002. V. 70. P. 3–11.
  53. *Strauss J., Schirrmeister L., Wetterich S. et al.* Grain-size properties and organic-carbon stock of Yedoma Ice Complex permafrost from the Kolyma lowland, north-eastern Siberia // *Global Biogeochem. Cycl.* 2012. V. 26. GB3003.
  54. *Svendsen J.I., Alexanderson H., Astakhov V.I. et al.* // Late Quaternary ice sheet history of northern Eurasia // *Quaternary Science Reviews*. 2004. V. 23. P. 1229–1272.
  55. *Tarnocai C., Canadell J.G., Schuur E.A.G. et al.* Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region // *Global Biogeochem. Cycl.* 2009. V. 23. GB2023.
  56. *Tesi T., Semiletov I., Hugelius G. et al.* Composition and fate of terrigenous organic matter along the Arctic land–ocean continuum in East Siberia: Insights from biomarkers and carbon isotopes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. V. 133. P. 235–256.
  57. *Tesi T., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al.* Matrix association effects on hydrodynamic sorting and degradation of terrestrial organic matter during cross-shelf transport in the Laptev and East Siberian shelf seas // *J. Geophys. Res. Biogeosci.* 2016. V. 121. P. 1–22.
  58. *Vonk J.E., Semiletov I.P., Dudarev O.V. et al.* Preferential burial of permafrost-derived organic carbon in Siberian-Arctic shelf waters // *J. Geophys. Res. Oceans*. 2014. V. 119(12). P. 8410–8421.
  59. *Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin III S.F.* Permafrost and the Global Carbon Budget // *Science*. 2006. V. 312. P. 1612–1613.

## Grain Size Properties of the Bottom Sediments from Buor Khaya Bay

A. S. Ulyantsev<sup>a, #</sup>, S. Yu. Bratskaya<sup>b, ##</sup>, Yu. O. Privar<sup>b</sup>

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

<sup>b</sup>*Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: uleg85@gmail.com*

<sup>##</sup>*e-mail: s.bratskaya@gmail.com*

The paper presents the results of grain size analysis of bottom sediments and subsea permafrost from three cores drilled in Buor-Khaya Bay. A pronounced lithologic differentiation of the studied terrigenous deposits, as well as a wide variety of granulometric and genetic types of deposits accumulated in various natural environments were revealed. The most of investigated sediments are represented by alluvial sands with wide range of size, pelletizing and sorting rates. The accumulation of these sands was closely related to the dynamics of riverine flow, slope processes, erosion and abrasion of the shore. Fine fraction of sediment is poorly sorted as compared to sands. According to the data set, the predominantly clastic nature of the sedimentary material and its continental origin has been established.

**Keywords:** Arctic, shelf, bottom sediments, subsea permafrost, core drilling, grain size