УДК 551.351

ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ ЧАУНСКОЙ ГУБЫ

© 2024 г. А. С. Ульянцев^{1, *}, Е. А. Стрельцова¹, А. Н. Чаркин^{2, **}

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия ² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия *e-mail: uleg85@gmail.com

> ** *e-mail: charkin@poi.dvo.ru* Поступила в редакцию 23.01.2023 г. После доработки 15.06.2023 г. Принята к публикации 18.07.2023 г.

По результатам обработки донных осадков, собранных в акватории Чаунской губы Восточно-Сибирского моря в 60-м рейсе НИС "Академик Опарин", состоявшемся в 2020 г., установлено, что их гранулометрический состав меняется от плохо сортированных алевритовых пелитов до хорошо сортированных песков. Результаты исследования позволили заключить, что основными механизмами осадконакопления в акватории Чаунской губы являются термоабразия, речной сток и абразия, а также ледовая седиментация и эоловый перенос. Выявленная зональность гранулометрических типов осадков сопряжена с рельефом дна и согласуется с областями влияния речного стока, абразии и термоабразии, а также направлением течений. Высокая встречаемость в осадках грубообломочного материала маркирует активную абразию береговой зоны и ледовый перенос крупных (до 15 см) обломков пород. Вертикальная по вскрытому разрезу изменчивость гранулометрического состава осадков в пределах верхних 20 см слоя отражает постепенное усиление терригенных (речных и термоабразионных) потоков осадочного материала в современных активно меняющихся условиях природной среды Арктики.

Ключевые слова: Восточно-Сибирское море, донный осадок, гранулометрический состав, лазерная дифракция, диаметр частиц, коэффициент сортировки, корреляционный анализ

DOI: 10.31857/S0030157424030117, EDN: QCAJQM

введение

Прибрежно-шельфовая зона шельфа Арктики представляет собой сложную природную систему, а в районах ее хозяйственного освоения – природно-техногенную систему, функционирование и эволюция которой определяется геологическими, геофизическими и геохимическими процессами. Потенциально опасными из них являются разрушение береговой зоны под действием термоабразии и термокарста, ледовая экзарация дна, дегазация недр, включение в современный цикл углерода древнего органического вещества, заключенного в многолетней мерзлоте [2-3, 15, 17-22, 24, 26]. Поскольку арктический регион является зоной приоритетных национальных интересов России, обеспечение и укрепление экономической и оборонной деятельности напрямую зависит от его изученности. Необходимость прогноза опасных явлений на арктическом шельфе при этом является весьма актуальной задачей. Интерес к изучению морфолитодинамики Чаунской губы связан со слабой изученностью этой акватории и незначительным количеством натурных данных. Возрастающая антропогенная нагрузка связана с вводом в мае 2020 г. в промышленную эксплуатацию плавучей атомной теплоэлектростанции "Академик Ломоносов", базирующейся в порту Певек [5]. Кроме того, планируемая эксплуатация Северного Морского пути, одним из ключевых транспортнологистических узлов которого является порт Певек, акцентирует внимание на геологических исследованиях Чаунской губы.

Гранулометрические характеристики донных осадков являются важным инструментом в морской геологии и литологии для характеристики седиментационных процессов в различных климатических обстановках [6, 13, 23]. Степень сортировки осадочного вещества, средний диаметр частиц и их распределение по размерам позволяют судить об условиях седиментации материала, его генезисе и инженерно-геологических свойствах. На фоне возрастающей антропогенной нагрузки характеристика гранулометрического состава донных осадков акватории Чаунской губы как индикатора изменений природной среды является актуальной задачей, например, при прогнозировании антропогенных рисков, планировании навигации. Целью настоящей работы были характеристика гранулометрического состава верхнего 20-см слоя донных осадков Чаунской губы Восточно-Сибирского моря и анализ его пространственной изменчивости по комплексу гранулометрических индикаторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Материалом для исследования послужили 174 пробы донных осадков, собранные на 48 станциях в 60-м рейсе НИС "Академик Опарин", проходившем с 26 сентября по 11 ноября 2020 г. [9]. В качестве инструмента сбора материала с борта судна использовали коробчатый пробоотборник типа Экман (0.25 м²). Сбор донных осадков на мелководье (до 10 м) производился с моторно-гребной лодки "Чирок-320Т". В качестве инструмента пробоотбора использовали ручной дночерпатель типа "Ван Вин" (0.04 м²). Схема расположения станций и их координаты приведены на рис. 1 и табл. 1 соответственно. После поднятия на борт судна ненарушенной пробы донных осадков наддонную воду сливали с помощью наружного шланга. далее делали врезки в толшу осадков. Пробы, собранные на мелководье, не стратифицировали. Последующие отбор проб,

обработку и литологическое описание производили в судовой лаборатории. Пробы (примерно 20 г влажного осадка) для гранулометрического анализа отбирали в пластиковые зип-пакеты и хранили в холодильнике при температуре +4°C до последующей лабораторной обработки.

Гранулометрический анализ донных осадков был выполнен на приборной базе Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Для анализа использовали метод лазерной дифракции после мокрого рассева песчаной фракции, что делалось с целью устранения влияния крупных зерен на результаты дифракционного анализа [10, 25]. Для пробоподготовки навеску осадка естественной влажности (2-3 г) помещали в мерный стакан, туда же добавляли 20 мл дистиллированной воды и 20 мл 0.7% раствора гексаметафосфата натрия, после чего проба оставлялась на сутки. Песчаную фракцию отделяли на сите с диаметром отверстий 0.063 мм, после чего расситовывали на фракции 0.063-0.125, 0.125-0.25, 0.25-0.5, 0.5-1, 1-2 и >2 мм. Разделенные таким образом фракции высушивали до постоянной массы и взвешивали с точностью 0.01 г.

Определение массового распределения частиц <63 мкм проводили на анализаторе частиц SALD2300 (Shimadzu, Япония) с использованием жидкостного модуля диспергирования при постоянном перемешивании (1500 об/мин) после ультразвукового воздействия (мощность – 40 Вт, частота – 32 кГц). Дисперсант и фоновая жидкость – дистиллированная вода. Непосредственно перед дифракционным анализом пробу



Рис. 1. Карта-схема района исследований. Справа приведена схема расположения станций отбора проб донных осадков.

• •	· · · · · · · · ·	-		
N⁰	Станция	Глубина воды, м	Широта, °с. ш.	Долгота, °в. д.
1	03	14	69.772	170.503
2	04	11	69.759	170.266
3	05	21	69.732	170.274
4	06	22	69.720	170.288
5	07	25	69.761	169.728
6	08	14	69.578	170.122
7	09	15	69.553	170.062
8	10	16	69.541	169.972
9	31	12	69.509	170.390
10	32	11	69.349	170.549
11	33	16	69.358	170.146
12	34	20	69.554	169.695
13	42	17	69.640	170.098
14	43	19	69.637	170.112
15	44	18	69.632	170.132
16	57	16	69.267	169.772
17	58	15	69.182	169.864
18	59	16	69.209	170.195
19	60	12	69.201	170.569
20	61	18	69.372	169.744
21	62	13	69.053	170.380
22	63	13	68.967	170.302
23	64	11	68.879	169.978
24	65	10	68.888	169.728
25	66	15	69.052	169.974
26	67	14	69.043	169.726
27	68	12	69.075	169.419
28	69	12	69.082	169.460
29	70	11	69.134	169.335
30	71	10	69.218	169.051
31	72	10	69.369	169.362
32	73	12	69.558	169.523
33	74	11	69.676	169.480
34	75	6	68.832	170.372
35	76	10	68.871	170.228
36	77	11	68.958	170.358
37	78	11	69.064	169.420
38	79	10	69.040	169.459
39	80	9	69.008	169.502
40	81	5	69.069	169.382
41	82	2	69.065	169.359
42	86	22	70.064	170.497
43	88	16	70.017	170.020
44	90	14	69.961	169.714
45	94	18	70.168	168.878
46	95	20	70.145	169.807
47	97	29	70.447	170.076
48	99	30	70.800	170.432

Таблица 1. Нумерация, глубина воды и координаты расположения станций отбора проб донных осадков

УЛЬЯНЦЕВ и др.

Таблица 2. Пет	речень расчетны	х гранулометри	ческих па	заметров
$\mathbf{I} \mathbf{u} \mathbf{v}_{\mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{I} \mathbf{u}} \mathbf{u} \mathbf{u}_{\mathbf{i}} \mathbf{u}_{\mathbf{i}} \mathbf{u}_{\mathbf{i}}$		A I pull y lower pr	I ICCNIA IIU	Jumerpor

Параметр	Расчетная формула	Ссылка
Средний диаметр	$M_Z = \frac{p5 + p16 + p50 + p84 + p95}{5}$	[10]
Коэффициент сортировки	$S_o = \sqrt{\frac{p75}{p25}}$	[6]
Стандартное отклонение	$\sigma_I = \frac{\phi 84 - \phi 16}{4} + \frac{\phi 95 - \phi 5}{6.6}$	[13]
Величина асимметрии	$Sk_{I} = \frac{\phi 16 + \phi 84 - 2\phi 50}{2(\phi 84 - \phi 16)} + \frac{\phi 5 + \phi 95 - 2\phi 50}{2(\phi 95 - \phi 5)}$	[13]
Величина эксцесса	$K_G = \frac{\phi 95 - \phi 5}{2.44 (\phi 75 - \phi 25)}$	[13]

Примечание: ф – соответствующий процентиль распределения частиц каждой пробы, рассчитанный по [16].

погружали в ультразвуковую ванну на пять минут, а воздействию ультразвука в анализаторе частиц подвергали в течение одной минуты непосредственно перед анализом. Измерения проводили с использованием программного пакета WingSALD трижды для каждой пробы. Усреднение результатов выполнено с помощью R-скрипта SALData, разработанного к.г-м.н. Д.Г. Борисовым (ИО РАН). В работе использована двоичная логарифмическая классификация осадков: >63 мкм (песок), 10–63 мкм (крупный алеврит), 2–10 мкм (тонкий алеврит) и <2 мкм (пелит).

Для характеристики гранулометрического состава исследованных осадков были рассчитаны процентное распределение фракций по массе, а также статистические параметры: средний диаметр частиц (M_{Z}), коэффициент сортировки (S_{o}) , стандартное отклонение размеров частиц (σ_1) , коэффициенты асимметрии (Sk_1) и эксцесса (K_G) . (табл. 2). Для статистических расчетов использованы процентили p5, p16, p25, p50, p75, p84, р95, рассчитанные для каждой пробы методом кусочно-линейной интерполяции кумулятивных размерных распределений. Ранее проведенное исследование гранулометрического состава отложений и многолетнемерзлых пород из залива Буор-Хая, богатых осадочным материалом песчаной размерности, показало занижение результатов расчета величины M_Z по трем процентилям [10]. В связи с этим для расчета M_Z в настоящей работе использовали пять процентилей: p5, p16, р50, р84, р95. Статистическая обработка результатов (корреляционный анализ) выполнена с использованием программного пакета Addinsoft XLSTAT Premium v2016.02.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Чаунская губа расположена в юго-восточной части Восточно-Сибирского моря и представляет собой залив полигональной формы северо-западной пространственной ориентации с множеством впалающих в нее мелких рек [8]. занимающая площадь 9200 км², что составляет примерно 1% от площади акватории Восточно-Сибирского моря [1]. Губа отличается относительной изолированностью от открытого водного пространства, вдается в материк более чем на сотню километров и достигает максимума ширины в 95 км, сообщаясь с Восточно-Сибирским морем проливами Средним и Малым Чаунскими и Певек. С востока губа ограничена обрывистым мысом Шелагским, в западной части вход в губу перекрывает о. Айон, отделенный от материка узким мелководным Малым Чаунским проливом. От него в сторону восточного берега и лежащих около него островов Малого и Большого Роутана протянулся довольно широкий пролив Средний. Через него при северо-восточных ветрах в губу поступают холодные воды и льды из открытой части Восточно-Сибирского моря [12].

Полигонально-тундровый ландшафт развит с западной (о. Айон и п-ов Кыттык) и южной (устьевая часть рек Чаун, Паляваам, Пучьэвеем, Лелювеем) сторон, где сосредоточены многочисленные термокарстовые озера, аласы и мелкие реки. Западный берег низменный, восточный более возвышенный. В рельефе дна выражены конусы выноса, наиболее крупные из которых сформированы реками Чаун, Паляваам, Ичвувеен, Лелювеем, Млельын, Апапельгын, впадающими



Рис. 2. Батиметрическая карта-схема Чаунской губы. Стрелками показано доминирующее направление течений. Жирной линией выделена изобата 10 м.

в южную, юго-восточную и восточную части губы. Средняя глубина акватории не превышает 20 м, максимальная отметка (31 м) зафиксирована в проливе Певек (рис. 2). По данным [4] состав осадочного вещества в Чаунской губе в значительной степени определяется гравитационными потоками поступающего с суши терригенного материала — продуктов термоабразии береговой зоны (о. Айон) и речного стока.

Основным течением в Чаунской губе является циклоническая циркуляция вод, поступающих через западную часть залива и опресненных за счет речного стока [12]. В кутовой части губы под влиянием местного речного стока поверхностные воды опресняются до 14–16‰, прогреваются до плюс 7–8°С и трансформируются в эстуарно-арктическую водную массу [14]. Осолоняясь в результате конвекции до 23–25‰ на поверхности и сохраняя прогрев до плюс 4–5°С, вновь трансформированные воды выходят на север в Восточно-Сибирское море вдоль восточного берега к мысу Шелагский.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для большинства исследованных донных осадков отмечена стратификация на окисленный. смешанный и восстановленный слои. Окисленный слой, как правило, представлен жидким алеврито-пелитовым илом в интервале 0-2 см, от светло-коричневого до темно-коричневого цвета, часто с примесью песка. Ниже в интервале обычно 2-5 см залегает смешанный слой, представленный мягкими или жилкими илами оливкового цвета, иногда с примесью песка. Под смешанным слоем залегают восстановленные толщи осадков, цвет которых изменяется от светло-серого до темно-серого. Как правило, это вязкие или вязко-пластичные алевритовые пелиты. Общим для восстановленных слоев осадков является широкое распространение гидротроилита в виде линз, слоев и мелких включений черного цвета. В табл. 3 представлены описание осадков и величины рассчитанных гранулометрических параметров. В качестве примера на рис. 3 представлены кривые размерных распределений частиц для донных осадков Чаунской губы с различным литологическим описанием.

Станция	Горизонт, см	Описание	<i>М_Z</i> , мкм	So	σ _I	K _G	Sk _I
03	0-2	Алевритовый ил светло-коричневого цвета с примесью песка, жидкий	66.0	3.40	2.28	0.85	-0.31
	2-5	Алевритовый ил оливкового цвета с примесью песка, мягкий	50.0	3.35	2.16	0.80	-0.40
	5-10	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, вязко-пластичный, с линзами гидротроилита		3.71	2.20	0.73	-0.32
	10-20	То же	38.2	3.26	2.14	0.80	-0.25
	0-2	Пелитовый ил светло-коричневого цвета, жидкий	10.3	2.11	1.70	1.07	0.03
	2-5	Пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	16.7	2.40	1.89	1.04	0.07
04	5-10	Пелит темно-серого цвета, вязко-пластичный, с линзами гидротроилита		1.99	1.56	1.09	-0.03
	10-20	То же	11.2	2.00	1.58	1.12	0.07

Таблица 3. Горизонты пробоотбора, литологическое описание и величины гранулометрических параметров исследованных донных осадков

Станция	Горизонт, см	Описание	<i>М_Z</i> , мкм	So	σ_I	K _G	Sk _I
	0-2	Алевритовый ил коричневого цвета с примесью песка, жидкий	43.3	2.91	2.39	0.99	0.22
05	2-5	Алевритовый ил оливкового цвета, мягкий	36.5	3.39	2.37	0.84	0.11
03	5-10	Алеврит пелитовый темно-серого цвета с вкраплениями гидротроилита, вязко-пластичный	52.1	3.58	2.42	0.85	0.14
	10-20	Тоже		3.56	2.30	0.84	0.21
	0-2	Алеврито-пелитовый ил с примесью песка светло-коричневого цвета, жидкий	56.4	2.69	2.31	1.19	0.20
06	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	26.1	2.79	2.13	0.92	0.10
00	5-10	Пелит алевритовый серого цвета со следами гидротроилита, пластичный	24.7	2.85	2.21	0.93	0.10
	10-20	То же	25.4	2.82	2.17	0.92	0.10
	0-2	Алеврито-пелитовый ил светло-коричневого цвета, жидкий	23.4	2.71	2.04	0.91	0.01
07	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	23.4	2.95	2.10	0.86	-0.05
	5-10	Алеврито-пелитовый ил светло-серого цвета, пластичный	23.8	3.00	2.13	0.85	-0.05
	10-20	То же	23.6	2.97	2.12	0.85	-0.05
08	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета	28.5	2.69	2.01	0.90	-0.23
	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, более плотный	31.3	2.74	2.07	0.91	-0.27
00	5-10	Пелит алевритовый серого цвета с крупными включениями гидротроилита, пластичный		2.54	1.92	0.93	-0.24
	10-20	То же		2.65	2.00	0.92	-0.26
	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета, жидкий		2.35	1.83	1.00	-0.27
00	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	21.9	2.30	1.81	1.01	-0.30
07	5-10	Пелит алевритовый серого цвета с единичными включениями гидротроилита, пластичный	21.9	2.32	1.82	1.00	-0.28
	10-20	То же	21.9	2.31	1.81	1.01	-0.29
	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета, жидкий	19.3	2.33	1.83	1.04	-0.12
10	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, пластичный	18.5	2.31	1.78	1.01	-0.23
	5-10	Пелит алевритовый серого цвета, вязко-пластичный	19.3	2.23	1.75	1.06	-0.11
	10-20	То же	18.9	2.27	1.77	1.03	-0.17
	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета, жидкий	22.1	2.40	1.80	0.96	-0.30
31	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	22.9	2.28	1.75	1.00	-0.29
51	5-10	Пелит алевритовый серого цвета, пластичный	20.5	2.24	1.74	1.02	-0.23
	10-20	Пелит алевритовый темно-серого цвета, вязко-пластичный	25.1	1.78	1.54	1.31	-0.38

Станция	Горизонт, см	Описание	<i>М_Z</i> , мкм	So	σ_I	K _G	Sk _I
	0-2	Алевритовый ил темно-коричневого цвета, жидкий	24.8	2.18	1.70	1.03	-0.29
	2-5	Алеврит пелитовый серого цвета, пластичный	24.6	2.24	1.76	1.03	-0.29
32	5-10	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, плотный, обогащен гидротроилитом	21.1	2.34	1.81	1.00	-0.24
	10-20	То же	22.9	2.28	1.78	1.02	-0.27
	0-2	Пелитовый ил коричневого цвета, жидкий	12.8	2.26	1.72	0.99	-0.06
	2-5	Пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	19.3	2.27	1.85	1.12	0.02
33	5-10	Пелит серого цвета, пластичный, с крупными линзами гидротроилита		2.33	1.71	0.92	-0.10
	10-20	Пелит темно-серого цвета, вязко-пластичный, с крупными линзами гидротроилита		2.15	1.66	1.03	-0.06
	0-2	Пелитовый ил коричневого цвета, жидкий	12.7	2.34	1.78	0.97	0.00
	2-5	Пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	18.1	2.61	1.96	0.96	0.02
34	5-10	Пелитовый ил темно-оливкового цвета, мягкий	12.7	2.54	1.83	0.89	-0.03
	10-20	Пелитовый ил серого цвета, мягкий, с включениями гидротроилита	16.0	2.56	1.92	0.94	0.04
42	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета с примесью песка, жидкий	39.4	2.77	2.28	1.09	0.19
	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	29.3	2.94	2.20	0.94	0.12
	5-10	Пелит алевритовый светло-серого цвета, пластичный		2.97	2.31	0.94	0.12
	10-20	Пелит алевритовый серого цвета, пластичный		2.61	2.32	1.09	0.12
	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета с примесью песка, жидкий	41.4	2.64	2.04	1.03	0.26
42	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета с примесью песка, мягкий		2.49	2.09	1.10	-0.04
43	5-10	Пелит алевритовый серого цвета с примесью песка, пластичный	49.6	2.73	2.31	1.09	-0.10
	10-20	Пелит алевритовый темно-серого цвета, вязко-пластичный, со следами гидротроилита	38.0	2.88	2.29	1.03	0.11
	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета, жидкий	24.8	2.93	2.12	0.88	-0.02
4.4	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	25.5	2.90	2.10	0.88	-0.04
44	5-10	Пелит алевритовый темно-серого цвета, пластичный, с массивными слоями гидротроилита	24.2	2.77	2.05	0.91	-0.01
	10-20	То же	20.6	2.72	2.00	0.92	0.00
	0-2	Алевритовый ил светло-коричнево цвета, жидкий	59.4	2.64	2.34	1.26	0.20
57	2—5	Алеврито-пелитовый ил светло-серого цвета, мягкий	18.0	2.45	1.94	1.03	0.06
31	5-10	Пелит серого цвета, пластичный	13.7	2.31	1.88	1.06	0.07
	10-20	Пелит темно-серого цвета с единичными включениями гидротроилита, пластичный	8.2	2.17	1.65	0.98	-0.03

	-						
Станция	Горизонт, см	Описание	<i>М_Z</i> , мкм	So	σ_I	K _G	Sk _I
	0-5	Алевритовый ил оливкового цвета, жидкий	56.9	4.74	2.49	0.67	0.01
58	5-10	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, пластичный, с включениями гидротроилита		4.91	2.58	0.68	0.08
	10-20	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, плотный, с мощными скоплениями гидротроилита	56.7	4.38	2.51	0.73	0.09
	0-2	Алеврито-пелитовый ил светло-коричневого цвета, жидкий	23.0	2.74	2.04	0.94	-0.06
50	2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, мягкий	22.4	2.57	1.96	0.97	-0.03
59	5-10	Пелит алевритовый серого цвета, пластичный	23.3	2.93	2.05	0.85	-0.13
	10-20	Пелит алевритовый темно-серого цвета, пластичный	13.8	2.61	1.87	0.88	-0.04
	0-2	Алевритовый ил коричневого цвета с примесью песка, жидкий	29.2	2.09	1.68	1.06	-0.28
	2-5	Алевритовый ил оливкового цвета, мягкий	27.3	2.07	1.65	1.07	-0.30
60	5-10	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, пластичный	29.9	2.23	1.82	1.03	-0.30
	10-20	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, вязко-пластичный	29.3	2.17	1.78	1.06	-0.26
61	0-1	Пелитовый ил светло-коричневого цвета, жидкий	9.5	2.02	1.58	1.06	-0.03
	1-5	Пелитовый ил оливкового цвета, полужидкий, с включениями гидротроилита	9.1	1.99	1.55	1.08	-0.05
	5-10	Пелитовый ил серого цвета, полужидкий, с включениями гидротроилита		2.08	1.63	1.04	-0.06
	10-20	Пелитовый ил серого цвета, мягкий, с включениями гидротроилита	8.8	2.02	1.60	1.10	-0.01
	0-2	Алевритовый ил темно-коричневого цвета с примесью песка, жидкий		2.30	1.78	0.96	-0.24
62	2-5	Алевритовый ил оливкового цвета с примесью песка, мягкий	30.5	2.38	1.85	0.96	-0.28
02	5-10	Алевритовый ил серого цвета с примесью песка, мягкий		2.32	1.83	0.98	-0.27
	10-20	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, вязко-пластичный, со следами гидротроилита	43.2	1.86	1.63	1.33	-0.54
	0-2	Песок красно-коричневого цвета	252	1.33	0.80	1.57	-0.21
	2-5	Песок светло-серого цвета	215	1.56	1.33	1.50	-0.52
63	5-10	Песок алевритовый серого цвета, плотный, с включениями гидротроилита	137	4.13	2.60	0.79	-0.34
	10-20	Песок алевритовый темно-серого цвета, плотный, с включениями гидротроилита	102	4.22	2.79	0.80	-0.01
	0-2	Песок красно-коричневого цвета	87.3	1.18	0.49	1.75	-0.43
64	2-10	Песок оливкового цвета	81.0	1.20	0.86	3.30	-0.57
	10-20	Песок светло-серого цвета	84.1	1.19	0.62	2.25	-0.50
	0-2	Песок коричневого цвета	79.8	1.28	0.60	1.23	-0.36
65	2-10	Песок оливкового цвета	79.3	1.26	0.58	1.33	-0.27
	10-20	Песок светло-серого цвета	79.6	1.27	0.59	1.28	-0.31

Станция	Горизонт, см	Описание	<i>М_Z</i> , мкм	So	σ _I	K _G	Sk _I
	0-2	Алеврито-пелитовый ил коричневого цвета с примесью песка, жидкий	26.5	2.96	2.10	0.84	-0.07
((2-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета с примесью песка, мягкий		3.19	2.20	0.81	-0.04
00	5-10	Пелит алевритовый серого цвета, мягкий, с включениями гидротроилита	28.3	3.38	2.17	0.75	-0.20
	10-20	Пелит алевритовый темно-серого цвета, вязко- пластичный, с включениями гидротроилита	31.2	2.95	2.02	0.81	-0.39
	0-2	Алевритовый ил коричневого цвета, жидкий	35.3	3.17	2.10	0.80	-0.37
(7	2-5	Песчано-алевритовый ил оливкового цвета, мягкий	52.5	2.99	2.15	0.91	-0.37
07	5-10	Песок алевритовый серого цвета, плотный	66.4	2.01	1.75	1.32	-0.38
	10-20	То же	69.7	1.94	1.94	1.47	-0.53
	0-5	Песчано-алевритовый ил оливкового цвета, жидкий	49.0	2.03	1.72	1.16	-0.50
68	5-10	Алеврит песчаный серого цвета, мягкий	59.4	1.94	1.77	1.34	-0.53
	10-20	Алеврит песчаный серого цвета, плотный	54.2	1.98	1.74	1.25	-0.51
	0-2	Песок заиленный светло-коричнево цвета	78.6	1.32	1.00	2.16	-0.38
69	2-5	Песок заиленный коричневого цвета	91.7	1.34	1.13	2.44	-0.47
	5-10	Алеврит песчаный темно-серого цвета, мягкий, с линзами гидротроилита	61.2	1.72	1.88	1.64	-0.62
	10-20	Алеврит песчаный темно-серого цвета, плотный	67.8	1.64	1.35	1.50	-0.48
	0-3	Песок коричневого цвета	122	1.60	1.43	1.69	-0.45
70	3-10	Песок оливкового цвета с линзами глины серого цвета		2.38	1.94	1.09	-0.51
	10-20	Песок светло-серого цвета с линзами глины серого цвета		1.87	1.63	1.37	-0.47
	0-5	Песок заиленный темно-коричневого цвета	78.3	1.42	1.08	1.70	-0.33
71	5-10	Песок заиленный темно-серого цвета с линзами гидротроилита	132	2.94	2.24	0.96	-0.28
	10-20	То же	105	2.02	1.59	1.11	-0.22
	0-5	Песок оливкового цвета	91.5	1.24	0.44	0.93	-0.02
70	5-10	Песок заиленный серого цвета	60.4	1.61	1.48	1.64	-0.60
12	10-20	Алеврит пелитовый темно-серого цвета, пластичный, обогащен гидротроилитом	46.1	4.37	2.46	0.72	0.02
	0-5	Песок заиленный оливкового цвета	104	1.79	1.90	1.65	-0.51
73	5-10	Песок заиленный серого цвета	93.5	2.29	2.18	1.20	-0.51
	10-20	Песок заиленный темно-серого цвета	99.0	1.98	2.01	1.43	-0.51
	0-2	Песок заиленный оливкового цвета	67.6	1.35	0.82	1.40	-0.35
	2-5	Песок заиленный серого цвета	59.1	1.60	1.41	1.64	-0.57
74	5-10	Песок заиленный темно-серого цвета	66.7	1.32	0.95	1.90	-0.41
	10-20	То же	62.9	1.44	1.13	1.71	-0.48
75	0-10	Песок заиленный темно-серого цвета, с включениями растительных остатков	156	2.89	2.13	0.94	-0.24

Станция	Горизонт, см	Описание	<i>М_Z</i> , мкм	So	σ	K _G	Sk _I
	0-3	Песок красно-коричневого цвета	203	1.68	1.04	0.91	-0.28
	3-5	Песок заиленный серого цвета	184	2.09	1.91	1.32	-0.54
76	5-10	Песок темно-серого цвета, с включениями гидротроилита	164	2.16	1.98	1.28	-0.50
	10-20	То же	174	2.12	1.94	1.30	-0.52
	0-2	Песок заиленный красно-коричневого цвета	139	1.77	1.56	1.43	-0.06
	2-5	Песок заиленный оливкового цвета	152	2.19	1.92	1.23	-0.24
77	5-10	Песок алевритовый серого цвета, пластичный	123	2.78	2.43	1.08	-0.31
	10-20	Песок алевритовый темно-серого цвета, пластичный, с включениями гидротроилита		3.15	2.49	0.97	-0.35
	0-2	Песчано-алевритовый ил оливкового цвета, жидкий	51.2	1.62	1.37	1.54	-0.48
78	2—5	Песчано-алевритовый ил светло-серого цвета, мягкий	52.8	1.49	1.07	1.48	-0.40
	5-10	Алеврит песчаный серого цвета, пластичный	51.8	1.53	1.22	1.62	-0.50
	10-20	Алеврит песчаный темно-серого цвета, вязко- пластичный		1.74	1.48	1.41	-0.45
79	0-2	Песчано-алевритовый ил оливкового цвета, жидкий	53.0	1.48	1.14	1.59	-0.47
	2-5	Песчано-алевритовый ил светло-серого цвета, мягкий	51.6	1.45	1.07	1.62	-0.45
	5-10	Алеврит песчаный серого цвета, пластичный	46.1	1.58	1.27	1.49	-0.47
	10-20	Алеврит песчаный темно-серого цвета, пластичный, с линзами гидротроилита	43.8	1.78	1.46	1.27	-0.47
	0-2	Песчано-алевритовый ил оливкового цвета, жидкий		1.41	0.88	1.33	-0.28
80	2-5	Песчано-алевритовый ил светло-серого цвета, мягкий		1.54	1.22	1.55	-0.48
	5-10	Алеврит песчаный серого цвета, пластичный	51.7	1.67	1.41	1.46	-0.50
	10-20	Алеврит песчаный темно-серого цвета, вязко-пластичный	53.6	1.60	1.31	1.50	-0.49
81	0-10	Песок заиленный серого цвета	68.9	1.39	0.75	1.07	-0.23
82	0-10	Песок темно-серого цвета	588	1.40	1.30	2.18	0.57
	0-2	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета, жидкий	21.9	2.85	2.07	0.88	0.06
	2-5	Пелитовый ил светло-серого цвета, жидкий	16.9	2.59	1.94	0.94	0.05
86	5-10	Пелитовый ил серого цвета, мягкий	8.3	2.12	1.65	1.03	-0.05
	10-20	Пелитовый ил темно-серого цвета, мягкий, с крупными линзами и массивами гидротроилита	20.3	2.67	1.96	0.91	0.00
	0-2	Алевритовый ил оливкового цвета, жидкий	39.6	3.13	2.08	0.81	-0.50
	2-5	Алевритовый ил светло-серого цвета, жидкий	48.5	1.90	1.81	1.34	-0.68
88	5-10	Алевритовый ил серого цвета, мягкий	34.7	3.20	2.07	0.78	-0.36
	10-20	Алевритовый ил серого цвета со следами гидротроилита	40.3	2.57	1.94	0.94	-0.53

Таблица 3. Окончание

Станция	Горизонт, см	Описание	<i>М_Z</i> , мкм	So	σ_I	K _G	Sk _I
	0-2	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета с примесью песка, жидкий	28.6	2.86	2.12	0.88	-0.14
90	2-5	Алевритовый ил светло-серого цвета с примесью песка, мягкий	42.4	2.79	2.02	0.87	-0.51
90	5-10	Алеврит пелитовый серого цвета, вязко-пластичный, с линзами песка	41.4	3.39	2.23	0.80	-0.30
	10-20	Алеврит пелитовый серого цвета, вязко- пластичный, с линзами песка	57.6	1.98	1.81	1.29	-0.57
	0-5	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета с примесью песка, жидкий	31.3	3.51	2.20	0.75	-0.14
94	5-10	Пелит алевритовый темно-серого цвета, вязко-пластичный, со следами гидротроилита	28.9	3.50	2.25	0.76	-0.12
	10-20	То же	31.6	3.57	2.19	0.73	-0.29
	0-2	Алеврито-пелитовый ил оливкового цвета с примесью песка, жидкий		3.16	2.17	0.81	-0.17
	2-5	Алеврито-пелитовый ил светло-серого цвета с примесью песка, жидкий		3.05	2.18	0.85	-0.17
93	5-10	Пелит алевритовый серого цвета, мягкий, с включениями гидротроилита		2.78	2.05	0.90	-0.26
	10-20	Пелит алевритовый темно-серого цвета, вязко-пластичный, с включениями гидротроилита		3.53	2.32	0.79	-0.09
	0-2	Пелитовый ил оливкового цвета, жидкий	9.4	2.11	1.67	1.05	-0.05
	2-5	Алеврито-пелитовый ил светло-серого цвета с примесью песка, жидкий		3.73	2.31	0.75	-0.04
97	5-10	Алеврито-пелитовый ил серого цвета с примесью песка, мягкий, с линзами гидротроилита	27.1	3.16	2.24	0.84	0.01
	10-20	Пелит алевритовый серого цвета, пластичный, с линзами гидротроилита	24.5	2.94	2.15	0.90	0.04
	0-2	Пелитовый ил оливкового цвета, жидкий	10.6	2.21	1.72	1.01	-0.04
00	2-5	Алеврито-пелитовый ил серого цвета, жидкий, с включениями гидротроилита	31.1	3.68	2.21	0.72	-0.14
77	5-10	Пелит алевритовый темно-серого цвета, пластичный, с линзами гидротроилита	30.0	3.43	2.24	0.77	-0.04
	10-20	То же	26.9	3.08	2.17	0.83	0.01

Грубообломочный (до 15 см) материал отмечен в юго-западной, южной и центральной частях Чаунской губы (ст. 58, 59, 63, 67–70, 75, 76, 80), а также в проливе Певек (ст. 04, 05, 06). Он представлен обломками сланцев, песчаников, алевролитов, гранитоидов. В западной части сосредоточены чистые и заиленные пески (ст. 69–74, 78–80). В области влияния речного стока, сосредоточенного на юге губы, распространены песчаные, алеврито-песчаные и алевритовые разности (ст. 63–65, 75, 77). В центральной и восточной частях (ст. 31, 32, 57–62, 66), а также в горле

и на выходе из губы (ст. 07, 86, 88, 90, 94, 95, 97, 99), распространены осадки алевритовой и алеврито-пелитовой размерности. Пелитовые осадки отмечены на ст. 33, 34, 61, 86, в поверхностном слое ст. 97 и 99 и восстановленном слое ст. 57.

Вертикальная по разрезу изменчивость гранулометрического состава исследованных осадков по расчетным статистическим параметрам и массовому содержанию гранулометрических фракций в пределах верхних 20 см для окисленного, смешанного и восстановленного слоев незначительна (таблицы 3–4). Наиболее значимая



Рис. 3. Примеры размерных распределений частиц в донных осадках Чаунской губы разного литологического описания. 1 - ст. 03, гор. 0-2 см (алевритовый ил); 2 - ст. 10, гор. 0-2 см (алевритовый ил); 3 - ст. 61, гор. 0-1 см (пелитовый ил); 4 - ст. 74, гор. 0-2 см (песок заиленный); 5 - ст. 76, гор. 0-3 см (песок).

разница отмечена на ст. 57, 67, 71, 72. Для исследованных донных осадков по мере перехода от окисленного слоя к восстановленному наблюдается общий тренд снижения средней величины процентного вклада песчаных фракций (>63 мкм), сопряженный с ростом вклада фракций алевритового и пелитового ряда (10-63, 2-10 и <2 мкм), что также сопровождается постепенным снижением средней величины M_Z (табл. 4). При этом для качественных гранулометрических характеристик донных осадков (S_o , σ_I , K_G и Sk_I ,) вертикальная по исследованному разрезу изменчивость проявляется крайне слабо. Можно лишь отметить невыраженный тренд роста с глубиной залегания осадков средней величины коэффициента сортировки σ_{I} , что объясняется общим снижением вклада песчаных фракций, отличающихся большей степенью сортировки по сравнению с тонкозернистыми осадками.

В целом, рассчитанные средние величины коэффициентов сортировки (S_o и σ_I ,) отражают низкую степень сортировки исследованных осадков, основная масса которых представлена алеврито-пелитовыми и алевритовыми разностями. Средние отрицательные значения Sk_I в совокупности с повышенными (>1) величинами K_G отражают преимущественно асимметричный полимодальный тип размерных распределений исследованных осадков, характерный для более тонкозернистых разностей (см. рис. 3). В связи с этим наблюдается низкая степень сортировки частиц, отражающаяся в повышенных значениях

 S_o и σ_I . Для осадков песчаной размерности в свою очередь полимодальность размерных распределений проявляется слабо, что сопряжено с более высокой степенью сортировки частиц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа донных осалков, поднятых со дна акватории Чаунской губы, выявили выраженную пространственную изменчивость их гранулометрического состава в зависимости от удаленности от берега, речного стока и глубины воды. В качестве примера на рис. 4 приведены пространственные распределения массовой доли (в %) гранулометрических фракций >63, 10-63, 2−10 и <2 мкм в окисленном слое донных осадков. В южной и западной частях исследованной акватории сосредоточены песчаные отложения, отличающиеся повышенной степенью сортировки. Величина So характеризуется здесь наименьшими значениями, и ее пространственное распределение визуально согласуется с массовой долей песка. Фракция 10-63 мкм сосредоточена в основном на востоке, а повышенные ее концентрации (>50%) отмечены на юго-западе и в западной части горла губы. Тонкозернистые (2-10 и <2 мкм) осадки распространены в центральной части, горле губы и на выходе в Восточно-Сибирское море.

Результаты корреляционно-регрессионного анализа позволили оценить связь между исследованными гранулометрическими параметрами и выделить характерные гранулометрические ассоциации донных осадков (табл. 5). Отмеченная сильная положительная корреляция процентного содержания фракций 2–10 и <2 мкм (r = 0.97), по-видимому, указывает на их родственный генезис в исследованных осадках.

Для этой же пары характерна значимая положительная корреляция с Sk_I , S_o и σ_I и отрицательная с M_Z , K_G и >63 мкм. В первом случае возрастание доли тонкозернистых фракций в осадках приводит к снижению степени сортировки (возрастают S_o и σ_I), а на размерных распределениях - к смещению кривой распределения частиц в сторону уменьшения диаметра частиц (Sk₁ также возрастает). Во втором случае общее снижение вклада тонкозернистых фракций приводит к увеличению M_Z , а также отражается на размерных распределениях, на которых наблюдается более симметричная кривая распределения частиц без выраженных вторичных максимумов (К_G стремится к значениям <1). Значимая отрицательная корреляция между содержанием песка (>63 мкм)

Таблица	4. Интервалы	значений и с	редние вели	ичины прог	центного в	клада грану	лометрически	1X
фракций и р	асчетных пара	аметров исслед	ованных до	онных осади	ков в окисл	пенном, сме	шанном и во	c-
становленны	ых слоях							

Параметр	Окисленный слой	Смешанный слой	Восстановленный слой	Восстановленный нижележащий слой
<i>n</i> *	48	45	45	36
>2 мм	$\frac{0.00-11.3}{0.44}$	$\frac{0.00-1.80}{0.00}$	$\frac{0.00-2.96}{0.17}$	$\frac{0.00-1.87}{0.05}$
	0.44	0.06	0.1/	0.05
1—2 мм	$\frac{0.00-5.76}{0.30}$	$\frac{0.00-1.26}{0.20}$	$\frac{0.00-1.67}{0.16}$	$\frac{0.00-1.06}{0.11}$
0.5—1 мм	$\frac{0.00-2.14}{0.49}$	$\frac{0.01 - 1.92}{0.40}$	$\frac{0.00-1.96}{0.34}$	$\frac{0.00-1.69}{0.26}$
250-500 мкм	$\frac{0.00-39.7}{2.71}$	$\frac{0.05-34.8}{2.55}$	$\frac{0.00-19.5}{1.70}$	$\frac{0.00-22.6}{1.47}$
125—250 мкм	$\frac{0.01-44.3}{6.56}$	$\frac{0.08-37.2}{5.64}$	$\frac{0.06-36.0}{4.93}$	$\frac{0.07 - 30.1}{3.25}$
63—125 мкм	$\frac{0.13 - 82.6}{19.8}$	$\frac{0.25-78.9}{18.0}$	$\frac{0.19 - 80.8}{16.8}$	$\frac{0.28-50.8}{12.8}$
31—63 мкм	$\frac{3.05-41.2}{15.0}$	$\frac{3.23-44.7}{15.5}$	$\frac{2.40-41.5}{14.9}$	$\frac{1.64-35.9}{16.3}$
10—31 мкм	$\frac{0.14-42.0}{21.0}$	$\frac{4.03-42.8}{22.8}$	$\frac{3.36-42.5}{23.6}$	$\frac{9.03-46.7}{25.6}$
2—10 мкм	$\frac{0.00-50.3}{23.0}$	$\frac{2.04-50.9}{23.4}$	$\frac{1.02-50.57}{24.9}$	$\frac{7.15-50.7}{26.7}$
<2 мкм	$\frac{0.00-24.4}{10.7}$	$\frac{0.45-21.4}{11.5}$	$\frac{0.41-27.32}{12.5}$	$\frac{3.31-27.7}{13.4}$
<i>М_Z</i> , мкм	$\frac{9.4-588}{67.1}$	$\frac{9.1-215}{52.3}$	$\frac{8.33-164}{47.5}$	$\frac{8.24-174}{40.7}$
S_o	$\frac{1.18-4.74}{2.28}$	$\frac{1.20-4.91}{2.46}$	$\frac{1.19-4.38}{2.56}$	$\frac{1.44-4.22}{2.47}$
σ_I	$\frac{0.44-2.49}{1.67}$	$\frac{0.58 - 2.58}{1.84}$	$\frac{0.59-2.60}{1.88}$	$\frac{1.13-2.79}{1.89}$
K_G	$\frac{0.67 - 2.18}{1.14}$	$\frac{0.68 - 3.30}{1.15}$	$\frac{0.72 - 2.25}{1.08}$	$\frac{0.79 - 1.71}{1.07}$
Sk _I	$\frac{-0.51 - +0.57}{-0.16}$	$\frac{-0.68 - +0.12}{-0.24}$	$\frac{-0.62 - +0.14}{-0.22}$	$\frac{-0.57 - +0.21}{-0.20}$

* Количество образцов.

Таблица 5. Корреляционная матрица гранулометрических параметров исследованных осадков (n = 174). **Полужирным** выделены значения коэффициента корреляции Пирсона r > 0.5 и < -0.5, *курсивом* – значения r, близкие к 0.5 и -0.5

Параметр	M _Z	So	σ_I	K _G	Sk _I	>63 мкм	10-63 мкм	2-10 мкм	<2 мкм
M _Z	_	-0.229	-0.222	0.418	-0.075	0.756	-0.474	-0.583	-0.564
S_o	-0.229	_	0.883	-0.745	0.423	-0.412	-0.011	0.470	0.530
σ_I	-0.222	0.883	_	-0.665	0.392	-0.493	0.044	0.534	0.579
K_G	0.418	-0.745	-0.665	_	-0.422	0.615	-0.223	-0.566	-0.593
Sk_I	-0.075	0.423	0.392	-0.422	_	-0.444	-0.280	0.710	0.693
>63 мкм	0.756	-0.412	-0.493	0.615	-0.444	_	-0.534	-0.834	-0.805
10-63 мкм	-0.474	-0.011	0.044	-0.223	-0.280	-0.534	_	-0.016	-0.054
2-10 мкм	-0.583	0.470	0.534	-0.566	0.710	-0.834	-0.016	_	0.971
<2 мкм	-0.564	0.530	0.579	-0.593	0.693	-0.805	-0.054	0.971	_



Рис. 4. Карты-схемы пространственного распределения массовой доли (в %) гранулометрических фракций в поверхностном (окисленном) слое осадков: а – фракция >63 мкм; б – фракция 10–63 мкм; в – фракция 2–10 мкм; г – фракция <2 мкм.

и фракций 2–10 (r = -0.83) и <2 мкм (r = -0.81) объясняется антагонизмом весового вклада песка в осадках и различиями их литологического состава.

Для исследованных осадков отмечена отрицательная связь степени сортировки частиц с асимметрией ($S_o - K_G$ и $\sigma_I - K_G$, r = -0.75 и -0.67соответственно) в совокупности с положительной корреляцией с концентрацией песка $(K_G - > 63$ мкм, r = 0.62). Возрастание массовой доли песчаной фракции в данном случае приводит к полимодальности кривой распределения частиц (К_G возрастает), однако при этом степень сортировки отложений возрастает (S_o и σ_I снижаются). В случае же осадков алеврито-пелитовой и пелитовой зернистости, составляющих основную массу проанализированных образцов, эта закономерность нарушается ввиду незначительного вклада фракции >63 мкм. Прямая корреляция M_{Z} ->63 мкм (r = 0.76) наряду с отрицательными с 10-63, 2-10 и <2 мкм (r = -0.47, -0.58 и -0.56 соответственно) указывает на то, что величина среднего диаметра частиц в большей степени определяется вкладом песчаной фракции.

На основе полученных данных была составлена карта-схема пространственного распределения гранулометрических типов поверхностного (окисленного) слоя донных осадков в акватории Чаунской губы (рис. 5). Песчаные (массовое содержание фракции >63 мкм не менее 70%) и алеврито-песчаные (массовое содержание фракции >63 мкм не менее 50%, 10– 63 мкм – не менее 20%) осадки распространены на глубинах до 15 м и сосредоточены в западной и южной частях губы. В западной, наиболее мелководной части губы, гранулометрический состав осадков определяется динамикой термоабразии широко развитых здесь полигонально-тундровых многолетнемерзлых отложений,



Рис. 5. Карта-схема пространственного распределения гранулометрических типов донных осадков поверхностного (окисленного) слоя. *1* – осадки песчаной размерности; *2* – осадки алеврито-песчаной размерности; *3* – осадки алевритовой размерности; *4* – осадки алевритовой размерности; *5* – осадки пелитовой размерности.

а широтное меридиональное распространение осадков связано с влиянием приходящего с севера течения. Не следует исключать поступление осадочного вещества через Малый Чаунский пролив, расположенный между о. Айон и п-овом Кыттык.

Южная часть Чаунской губы, в свою очередь, больше подвержена влиянию речного стока, также несущего значительное количество продуктов термоабразии. Как и в западной части губы, здесь сосредоточены осадки песчаной и алеврито-песчаной размерности, но пространственное распространение последних заметно меньше. По-видимому, это связано с большей сортировкой частиц под влиянием гидродинамики по сравнению с термоабразионными потоками осадочного вещества, сосредоточенными на западе. Также накладывается влияние преобладающего течения, постепенно угасающего к югу и циклонически меняющего направление на северо-восток и север. Область около м. Наглойнын, расположенная между западной и южной частями губы, отличается сравнительно узкой зоной распространения крупнозернистых осадков. Это вызвано относительной изолированностью юго-западной части Чаунской губы от влияния речного стока и термоабразии, а основой петрофонда донных осадков здесь являются сланцы, частично

ОКЕАНОЛОГИЯ том 64 № 3 2024

выходящие на поверхность суши в виде плит близ м. Наглойнын [12].

Осадки алевритовой размерности (массовое содержание фракции 10–63 мкм не менее 50%, 2–10 мкм – не менее 20%) сосредоточены в юго-западной и восточной частях Чаунской губы в интервале глубин 15–20 м. Область их пространственного распространения примыкает к зоне алеврито-песчаных осадков, постепенно переходящих в алевритовые. Как и в случае крупнозернистых разностей, распространение осадков алевритовой размерности сопряжено с динамикой речного стока, термоабразии и течениями, а наблюдающиеся пространственные флуктуации связаны, по-видимому, уже с влиянием сезонной ледовой разгрузки и эоловой транспортировки осадочного вещества.

В центральной части Чаунской губы, в горле и на выходе в Восточно-Сибирское море в интервале глубин 15-30 м распространены осадки алеврито-пелитовой (массовое содержание фракции 10-63 мкм не менее 20%, суммы 2-10 и <2 мкм – не менее 50%) и пелитовой (массовое содержание фракции 2-10 мкм не менее 50%, <2 мкм – не менее 20%) размерности. Последние распространены компактными зонами в центральной части губы, вдоль восточной части горла и на севере. Такая зональность связана с изолированностью от влияния речного стока и термоабразии и сопряжена с течениями, способствующими гидродинамической сортировке наиболее тонкозернистых фракций. Основную площадь центральной и горловой части исследованной акватории занимают осадки алеврито-пелитовой размерности. Им присуща относительно низкая степень сортировки, связанная с широким диапазоном размерных групп в спектрах распределения частиц. Зональность распределения этой группы осадков также связана с удаленностью от влияния речного стока, абразии и термоабразии, а изменчивости гранулометрического состава способствует динамика течений, сезонность ледостава и ветрового распространения частиц. Не следует исключать влияния сезонных нагонных ветров, способствующих пространственному перераспределению поверхностных донных осадков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс полученных в результате исследования данных по гранулометрическому составу поверхностных донных осадков Чаунской губы Восточно-Сибирского моря позволил охарактеризовать его пространственную изменчивость, на формирование которой в первую очередь оказали региональные физико-географические факторы, литодинамика и генезис осадочного материала. Выявленная здесь зональность гранулометрических типов осадков сопряжена с рельефом дна и согласуется с областями влияния речного стока, термоабразии, абразии, направлением течений. Зафиксированный тренд снижения массовой доли песка при переходе от окисленного слоя к восстановленному, сопровождающийся взаимным ростом вклада более тонкозернистых фракций и снижением среднего диаметра частиц, свидетельствует об активации в современных условиях терригенных (речных и термоабразионных) потоков, несущих большие количества песчаного материала.

Полученные в настояшем исследовании результаты согласуются с полученными ранее данными [4] и подтверждают наблюдаемые в настоящее время тренды изменчивости природной среды Арктики, чаще всего связываемые с колебаниями климата [18, 20-22, 24]. Учитывая незначительную биопродуктивность акватории Чаунской губы [11–12], анализ рассчитанных гранулометрических параметров позволяет заключить, что для исследованных осадков характерны выраженная полимиктовость и кластическое происхождение. Установленная в результате исследования вариабельность гранулометрических характеристик в окисленном, смешанном и восстановленном слоях донных осадков отражает изменчивость физико-географических обстановок морфолитогенеза Чаунской губы на отдельных временных этапах осадконакопления в пределах верхней 20-сантиметровой толщи осадков. В конечном счете эта изменчивость в значительной степени определяла гранулометрический состав исследованных осадков. При этом влияние речного стока, термоабразии, абразии, а также ледовой и эоловой седиментации оставалось определяющим.

Благодарности. Авторский коллектив выражает благодарность к. г. н. П.Ю. Семкину и к. б. н. В.Л. Семину за помощь в сборе донных осадков в прибрежных мелководных условиях.

Источники финансирования. Аналитические работы и интерпретация результатов выполнены при финансовой поддержке РНФ (проект № 19-77-10044). Финансирование экспедиционных работ выполнено за счет государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Восточно-Сибирское море: энциклопедия / авт. и сост. И.С. Зонн, А.Г. Костяной, А.В. Семенов. М.: Междунар. отношения, 2014. 173 с.
- 2. Дударев О.В., Чаркин А.Н., Шахова Н.Е., и др. Современный литоморфогенез на восточно-арктическом шельфе России. Томск: Изд-во ТПУ, 2016. 192 с.
- 3. 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.
- 4. Полтавская Н.А., Гершелис Е.В., Оберемок И.А. и др. Особенности состава органического вещества донных осадков Чаунской Губы (Восточно-Сибирское Море) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 2. 130–146.
- Россия ввела в промышленную эксплуатацию первую в мире плавучую АЭС. ТАСС. https://tass.ru/ekonomika/8540307. (дата обращения: 22.01.2023).
- 6. *Свальнов В.Н., Алексеева Т.Н.* Гранулометрический состав осадков Мирового океана. М.: Наука, 2005. 297 с.
- 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.
- 8. Стремяков А.Я. К вопросу о происхождении ориентированных озер // Многолетнемерзлые горные породы различных районов СССР. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1963. С. 75–107.
- Ульянцев А.С., Чаркин А.Н., Семин В.Л. и др. Геологические исследования верхней осадочной толщи Чаунской губы в 60 рейсе НИС "Академик Опарин" // Океанология. 2021. Т. 61. № 4. С. 666–668.
- 10. Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Привар Ю.О. Гранулометрические характеристики донных отложений губы Буор-Хая // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 452–465.
- Экосистемы и фауна Чаунской губы и сопредельных вод Восточно-Сибирского моря // Исследования фауны морей / Под ред. Скарлато А.О. СПб: ЗИН РАН, 1994. Вып. 48 (56).153 с.
- Экосистемы, флора и фауна Чаунской губы Восточно-Сибирского моря // Исследования фауны морей / Под ред. Скарлато А.О. СПб: ЗИН РАН, 1994. Вып. 47 (55). 267 с.
- 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.
- Golikov A.N., Averincev V.G. Distribution patterns of bentic and ice biocoenoses in the high latitudes of the polar basin and their part in the biological structure of the world ocean / Polar Oceans. Arctic Inst. Of North America, Canada, 1977. P. 331–360.

- 15. *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.
- Krumbein W.C. Size frequency distributions of sediments // Journal of sedimentary petrology. 1934. V. 4. P. 65–77.
- 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. 7341.
- 18. *Martens J., Wild B., Muschitiello F. et al.* Remobilization of dormant carbon from Siberian-Arctic permafrost during three past warming events // Science Advances. 2020. V. 6. № 42. eabb6546.
- 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.
- 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.

- 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.
- 22. *Shakhova N., Semiletov I., Chuvilin E.* Understanding the permafrost-hydrate system and associated methane releases in the east siberian arctic shelf // Geosciences. 2019. V. 9(6). 251.
- Strauss J., Schirrmeister L., Wetterich S. et al. Grainsize properties and organic-carbon stock of Yedoma Ice Complex permafrost from the Kolyma lowland, northeastern Siberia // Global Biogeochem. Cycl. 2012. V. 26. GB3003.
- Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C. et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release // Nature. 2019. V. 569. P. 32–34.
- 25. *Ulyantsev A.S., Streltsova E.A., Charkin A.N.* Lithological and granulometric data for the upper sedimentary layer of the Chaun Bay, East Siberian Sea // Data in Brief. 2023. V. 46. 108813.
- Wild B., Shakhova N., Dudarev O. et al. Organic matter composition and greenhouse gas production of thawing subsea permafrost in the Laptev Sea // Nature Communications. 2022. V. 13. 5057.

GRAIN SIZE PROPERTIES OF SURFACE BOTTOM SEDIMENTS FROM THE CHAUN BAY

A. S. Ulyantsev^{a, *}, E. A. Streltsova^a, A. N. Charkin^{b, **}

 ^a Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
^b Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
* e-mail: uleg85@gmail.com
** e-mail: charkin@poi.dvo.ru

Based on the results of analysis of 174 samples of bottom sediments collected at 48 stations in the Chaun Bay during the 60th cruise of R/V "Academic Oparin" (October 2020), it was found that their particle size composition varies from poorly sorted silty clay to good sorted sand. The results of the study led to conclude that the main sedimentation mechanisms in the Chaun Bay are thermoabrasion, riverine runoff and abrasion, as well as ice and aeolian transport. The zoning of grain size types of the bottom sediments is related to the bottom topography and consistent with areas affected by river discharge, abrasion and thermoabrasion, as well as with the direction of currents. High occurrence of coarse clastic matter in sediments indicates abrasion of the coastal zone and active ice transport of large (up to 15 cm) rock fragments. The vertical variability of the granulometric parameters of the studied bottom sediments within the upper 20 cm layer reflects gradual Late Holocene intensification of terrigenous (fluvial and thermoabrasion) fluxes under the current climate changes in the Arctic.

Keywords: East Siberian Sea, bottom sediment, particle size, laser diffraction, particle diameter, sorting coefficients, correlation analysi