

УДК 552.181

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ГУБЫ БУОР-ХАЯ

© 2024 г. А. С. Ульяновцев*

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: uleg85@gmail.com

Поступила в редакцию 31.10.2022 г.

После доработки 24.11.2022 г.

Принята к публикации 16.12.2022 г.

По результатам обработки 99 образцов донных отложений и многолетнемерзлых пород из скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15, пробуренных в акватории губы Буор-Хая, показаны различия их минерального состава, обусловленные палеогеографическими факторами, а именно позднечетвертными колебаниями климата и уровня моря, региональной гидродинамикой. Основу легкой фракции минералов составили кварц и полевые шпаты (преимущественно плагиоклазы), обнаруженные в виде зерен различной размерности и степени окатанности, а также тонкодисперсной кластичности. В меньшей степени отмечено присутствие хлоритов, каолинита и серпентинов, редко встречаются иллит и смектит. В тяжелой фракции (средний выход 0.95%), сосредоточенной в тонкозернистых песках, было идентифицировано 42 акцессорных минерала. Ее основу составили пироксены, амфиболы, карбонатит, эпидот, цоизит, магнетит, слюда, гранат, лимонит, сфен, лейкоксен, ильменит. В меньших количествах обнаружены рутил, кианит, силлиманит, циркон, турмалин, апатит, ставролит. В исследованных толщах повсеместно встречаются растительные остатки и углеподобные частицы (предположительно кероген), вклад которых превышает 5% по массе в ряде горизонтов. Результаты исследования позволили заключить, что основой петрофона исследованных отложений, вероятнее всего, являются осадочные горные породы Хараулахского хребта Верхоянской горной системы, соответствующие песчаникам, алевролитам и аргиллитам. Присутствие в отложениях характерных акцессорных минералов маркирует разгрузку магматических и метаморфических горных пород, но их вклад незначителен и носит подчиненный характер. К ним, вероятно, также относятся породы Верхоянского комплекса, распространенные близ п. Тикси.

Ключевые слова: Арктика, шельф, донные отложения, подводная мерзлота, минералы, микроскопия, факторный анализ

DOI: 10.31857/S0030157424010093, **EDN:** SNZGVQ

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность изучения прибрежно-шельфовой зоны Арктики, представляющей собой сложную природную систему, определяется масштабом решаемых задач, встающих перед Российской Федерацией, усиливающей освоение ресурсов и пространства Арктики в сложных и активно изменяющихся природно-климатических условиях. К наиболее значимым климатически опосредованным процессам относятся деградация прибрежной и подводной многолетней мерзлоты, термоабразия береговой зоны, дегазация морского дна, усиление разгрузки речного и грунтового стока, способствующие дисбалансу биопродуктивности акваторий и цикла углерода в Арктике [6, 18, 22, 29–35]. Планируемая эксплуатация Северного морского пути и развитие ресурсодобывающей отрасли в Арктике акцентируют внима-

ние на комплексных исследованиях морского дна на шельфе арктических морей России как важнейшего логистического элемента.

Минеральный состав является надежным индикатором генетической информации о донных осадках и условиях образования горных пород [2, 16]. Дополнение уже созданных баз данных по геохимическому и литологическому составу донных осадков арктических морей [21] индикаторными минералогическими показателями способствует более глубокому пониманию природных процессов в Арктике. В условиях современных климатических колебаний и увеличивающейся антропогенной нагрузки расширение комплекса индикаторов для характеристики позднечетвертной морфолитодинамики прибрежной зоны арктических морей России является актуальной задачей. Целью работы были сравнительный анализ состава породообразующих и акцессорных

минералов, а также органических включений толщ донных отложений губы Буор-Хая, общая характеристика петрофонда и изменчивости состава минералов в исследованной части моря Лаптевых по комплексу минералогических индикаторов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фактический материал для исследования (донные отложения и многолетнемерзлые грунты) был собран автором в полярных буровых экспедициях, организованных Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичева ДВО РАН (г. Владивосток), Институтом мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (г. Якутск), Национальным исследовательским Томским политехническим университетом (г. Томск) и МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва). Начальник экспедиций — д-р геогр. наук, член-корр. РАН И.П. Семилетов, зам. начальника экспедиций — д-р геол.-минерал. наук О.В. Дударев. Скважины были пробурены с припайного льда в 2014 г. в Ивашкиной лагуне п-ва Быковский (1D-14), вблизи северного мыса о. Муостах (3D-14) и в 2015 г. севернее о. Муостах (1D-15) (см. рис. 1). Литологическое описание кернов бурения выполнено в полевых условиях непосредственно после их извлечения из скважины и переноса в лабораторию. Пробы консолидированных многолетнемерзлых пород отбирали с помощью аккумуляторной дрели и стальных коронок, пробы талых отложений отбирали стальными шпателем. Далее пробы замораживали и хранили в морозильнике при температуре -20°C до проведения лабораторной пробоподготовки. Для выполнения анализов пробы были высушены до постоянной массы в течение 48 ч при температуре $+60^{\circ}\text{C}$ в сушильном шкафу.

Минералогический анализ выполнен в Геологическом институте Кольского научного центра РАН группой технологической минералогии (аналитики В.И. Басалаева и А.Б. Калачева). Для анализа пробы донных осадков (50–100 г) отмучивали с сохранением глинистых фракций. Далее песчаные фракции шлихов расситовывали на классы <0.1 , $0.1-0.25$, $0.25-0.5$, $0.5-1$, $1-2.5$, $2.5-5$ и >5 мм с использованием комплекта сит с размерами ячеек 0.1, 0.25, 0.5, 1, 2.5 и 5 мм, высушивали до постоянной массы и взвешивали с точностью 0.1 г на весах HL-400. Материал классов $0.5-1$, $1-2.5$, $2.5-5$ и >5 мм был визуально исследован на стереомикроскопе Альтами SM0745. Для проведения полуколичественного анализа был взят препаративно выделенный материал тоньше 0.5 мм, чтобы определить наиболее репрезентативный размерный класс тяжелой фракции. Для этого классы <0.1 , $0.1-0.25$ и $0.25-0.5$ мм

были разделены по плотности в бромформе ($\rho = 2.89 \text{ г/см}^3$) на тяжелую и легкую фракцию в стеклянных делительных воронках, высушены, взвешены и визуальным образом изучены. Детальный анализ и расчет процентного содержания акцессорных минералов был выполнен в классе $0.1-0.25$ мм, как наиболее представительном по результатам полуколичественного анализа.

Дальнейшая обработка материала выполнена по следующей схеме:

1. Взвешивание пробы препаративно выделенного класса тяжелых минералов $0.1-0.25$ мм.
2. Магнитная и электромагнитная сепарация с использованием универсального постоянного ручного магнита С-5 (магнит Сочнева), в результате чего отделяли ферромагнитную, парамагнитную и диамагнитную подфракции минералов.
3. Взвешивание разделенных подфракций.
4. Визуальная идентификация минералов в разделенных подфракциях. В качестве базового инструмента использовали стереомикроскоп Альтами SM0745. Для более точного определения некоторых минералов применялись микрохимические и иммерсионные методы. В последнем случае использовали поляризационный микроскоп Carl Zeiss Amplitival. Рентгеноструктурный анализ применяли в случае невозможности визуальной идентификации минералов. Анализы выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-2. Для поиска люминесцирующих минералов (шеелита, содалита и др.) применялась портативная УФ лампа.
5. Расчет процентной концентрации минералов всех исследованных подфракций в классе $0.1-0.25$ мм. Статистическая обработка результатов выполнена с помощью программного пакета XLSTAT Premium v2016.02.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По совокупности литологических данных в толщах исследуемых отложений доминируют пески средней и тонкой зернистости, в виде отдельных включений и слоев встречаются остатки наземной растительности, почвы, торф, рассеянный гравийно-галечный материал и отдельные слои окатанной гальки [13–14]. Результаты ситового анализа и содержание препаративно выделенных фракций исследованных отложений представлены в табл. 1. Базовыми породообразующими минералами легкой фракции в исследованных толщах являются кварц и полевые шпаты (преимущественно плагиоклазы), обнаруженные в виде зерен различной степени окатанности и размерности. Они сосредоточены в тонкозернистых песках ($0.1-0.25$



Рис. 1. Карта-схема района исследований и расположение пробуренных скважин. Надписи: дельта Лены; протока Быковская; Хараулахский хребет; губа Буор-Хая; п-ов Буор-Хая; море Лаптевых; п-ов Быковский; Залив Неелова; Тикси; о. Муостах.

и 0.25–0.5 мм), также встречаются в грубозернистых песках (0.5–1 и 1–2.5 мм) и тонкозернистых (<0.1 мм) фракциях. В меньшей степени в осадках отмечено присутствие представителей групп хлорита, каолинита и серпентина, сосредоточенных в более тонких фракциях (<0.1 мм). Редко встречаются иллит и смектит. В гравийной фракции (>2.5 мм) встречаются обломки песчаников, алевролитов, гнейсов, граувакк.

Тяжелая фракция минералов сосредоточена в тонкозернистых песках (0.1–0.25 мм), и ее состав более разнообразен. Выход тяжелой фракции минералов составил от 0.1 до 5.7% (в среднем 0.95%) по массе. Основу тяжелой фракции составили амфиболы (am), пироксены (px) и карбонатит (carb), средний вклад которых составил 24.1, 10.4 и 10.8% соответственно. В меньших количе-

ствах отмечены эпидот (ep), цоизит (zo), магнетит (mt), слюда (mc), гранат (gr), лимонит (li), сфен (sph), лейкоксен (lx), ильменит (il), рутил (r), кинанит (ky), силлиманит (si), циркон (zr), турмалин (tu), апатит (ap), хлорит (cl), ставролит (st). На отдельных горизонтах обнаружены зерна шпинели (šp), хромдиоксида (crdp), магнезиохромита (mgcr), оливина (ol), шеелита (sh), флюорита (fl), уваровита (uv), пумпеллиита (pu), пренита (ph), пирита (py), молибденита (mo), халькопирита (chp), арсенопирита (ar), гематита (hm), хромита (cr), доломита (do), сидерита (sr), гетита (gh), корунда (cor), спессартина (spr). Интервалы значений процентного содержания минералов тяжелой фракции, их средние значения и распределение в исследованных отложениях представлены в табл. 2 и на рисунках 2–4 соответственно.

Таблица 1. Процентное распределение размерных фракций, массовая концентрация тяжелой фракции минералов (ТФ), растительных остатков (РАСТ) и керогена (КЕР) в донных отложениях скважины 1D-14, 3D-14 и 1D-15

Скважина	Горизонт, см	<0.1 мм	0.1–0.25 мм	0.25–0.5 мм	0.5–1 мм	1–2.5 мм	2.5–5 мм	>5 мм	ТФ, %	РАСТ, %	КЕР, %
1D-14	0	89.7	4.9	4.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.1	++	–
1D-14	55	18.9	46.3	27.0	5.4	2.4	0.0	0.0	0.6	–	++
1D-14	96	89.5	8.8	1.0	0.4	0.2	0.0	0.0	0.1	4.0	–
1D-14	190	26.9	38.5	29.2	4.0	1.5	0.0	0.0	0.3	–	–
1D-14	296	72.7	13.8	8.2	2.5	2.5	0.3	0.0	0.1	+++	–
1D-14	415	46.4	14.0	12.3	7.3	13.6	4.0	2.3	0.2	+++	+++
1D-14	448	70.4	12.4	14.0	2.5	0.6	0.0	0.0	0.1	–	++
1D-14	496	27.7	29.8	30.6	7.5	3.8	0.6	0.0	0.4	–	–
1D-14	546	52.8	19.5	15.7	5.7	5.4	0.9	0.0	0.2	–	–
1D-14	878	39.3	39.6	9.2	5.1	5.9	0.6	0.4	0.4	–	+++
1D-14	1039	45.5	53.0	1.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.6	0.2	+++
1D-14	1142	17.7	22.6	42.5	13.0	4.1	0.1	0.0	0.5	6.8	+++
1D-14	1218	69.3	28.7	1.4	0.5	0.1	0.0	0.0	1.6	++	+++
1D-14	1358	44.6	21.6	21.7	7.7	4.3	0.2	0.0	0.6	+++	0.3
1D-14	1391	16.7	40.5	29.4	2.8	4.8	3.9	2.0	3.4	+++	+++
1D-14	1471	8.4	22.1	26.4	24.1	18.3	0.8	0.0	0.8	++	0.2
1D-14	1486	55.7	34.6	8.9	0.7	0.0	0.0	0.0	1.1	1.1	2.1
1D-14	1631	42.9	54.4	2.0	0.3	0.3	0.0	0.0	1.7	1.5	+++
1D-14	1743	31.7	29.4	26.7	7.1	4.9	0.2	0.0	0.6	++	++
1D-14	1796	22.5	16.2	40.4	8.5	11.9	0.6	0.0	0.6	++	+++
1D-14	1901	10.8	66.3	13.9	3.5	4.7	0.7	0.0	2.1	++	1.6
1D-14	2059	85.4	9.9	2.3	1.2	0.8	0.5	0.0	0.5	+++	0.2
1D-14	2087	92.7	6.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	3.7	0.4
1D-14	2366	6.5	46.3	44.2	1.9	0.5	0.2	0.5	1.4	–	++
1D-14	2460	7.7	8.0	53.5	13.8	12.5	2.5	2.1	0.6	–	1.2
1D-14	2701	4.0	5.8	76.2	13.4	0.6	0.0	0.0	0.3	–	–
1D-14	3154	11.9	13.2	59.5	8.4	4.7	1.0	1.4	0.7	–	6.8
1D-14	3313	6.9	41.4	44.6	6.4	0.6	0.0	0.0	1.1	–	+++
1D-14	3447	6.1	16.3	36.5	24.3	15.2	0.9	0.6	0.8	–	15.7
1D-14	3597	58.5	41.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1	5.9	+++
1D-14	3745	6.6	30.7	58.3	3.8	0.5	0.0	0.0	1.5	–	3.3
1D-14	3782	72.3	25.8	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	0.4	++++
3D-14	10	4.8	4.3	24.8	26.3	37.6	1.4	0.8	0.1	–	–

Таблица 1. Продолжение

Скважина	Горизонт, см	<0.1 мм	0.1–0.25 мм	0.25–0.5 мм	0.5–1 мм	1–2.5 мм	2.5–5 мм	>5 мм	ТФ, %	РАСТ, %	КЕР, %
3D-14	155	65.7	33.5	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	2.1	+
3D-14	310	34.0	59.8	5.3	0.6	0.2	0.0	0.0	0.5	+++	++++
3D-14	402	46.3	49.7	3.5	0.5	0.1	0.0	0.0	0.7	+++	++
3D-14	422	49.0	36.5	12.1	2.0	0.4	0.0	0.0	0.1	++	–
3D-14	845	33.0	52.7	12.7	0.9	0.4	0.2	0.0	0.4	+++	+++
3D-14	896	21.7	21.5	27.3	12.7	7.3	2.5	7.0	0.8	–	–
3D-14	1057	47.2	49.1	3.4	0.3	0.0	0.0	0.0	0.6	+++	+++
3D-14	1080	36.3	46.0	14.6	2.5	0.5	0.0	0.0	0.5	–	++
3D-14	1170	95.7	4.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	+++	–
3D-14	1249	80.7	12.4	6.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.2	–	–
3D-14	1334	63.4	35.1	1.0	0.3	0.1	0.0	0.0	0.7	+++	++
3D-14	1414	82.4	8.7	4.1	1.9	2.6	0.3	0.0	0.1	–	+++
3D-14	1450	85.5	7.8	3.6	1.8	1.3	0.0	0.0	0.1	–	–
3D-14	1471	54.9	17.3	14.7	6.6	6.1	0.4	0.0	0.4	–	–
3D-14	1475	34.4	24.0	13.5	11.5	14.5	2.0	0.0	0.2	–	++
3D-14	1499	48.9	26.1	11.8	7.6	5.5	0.3	0.0	2.1	–	–
3D-14	1540	89.6	7.8	1.5	0.6	0.6	0.0	0.0	0.1	–	–
3D-14	1740	95.2	3.9	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	+++	–
1D-15	0	39.1	57.0	3.1	0.6	0.3	0.0	0.0	4.2	0.5	++++
1D-15	110	97.2	2.4	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	+++	–
1D-15	210	95.3	3.8	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	++	0.4
1D-15	280	94.5	4.2	1.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	+++	–
1D-15	321	95.9	3.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	++	–
1D-15	395	90.1	6.9	2.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	++	–
1D-15	510	79.5	18.2	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	++	–
1D-15	612	65.6	25.2	7.0	1.3	1.0	0.0	0.0	0.6	+++	–
1D-15	675	66.4	28.7	4.6	0.3	0.0	0.0	0.0	0.3	–	–
1D-15	750	65.3	27.7	6.6	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	8.7	–
1D-15	794	80.2	17.6	1.6	0.0	0.5	0.0	0.0	0.5	7.8	–
1D-15	852	55.8	27.5	12.7	3.1	0.9	0.0	0.0	0.9	–	–
1D-15	1114	44.5	49.6	5.9	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	–	–
1D-15	1195	59.6	28.1	10.5	1.4	0.4	0.0	0.0	0.7	+++	+++
1D-15	1249	41.1	48.9	8.1	1.3	0.6	0.0	0.0	1.9	+	++
1D-15	1284	33.7	39.5	25.1	1.4	0.3	0.0	0.0	1.4	–	–

Таблица 1. Окончание

Скважина	Горизонт, см	<0.1 мм	0.1–0.25 мм	0.25–0.5 мм	0.5–1 мм	1–2.5 мм	2.5–5 мм	>5 мм	ТФ, %	РАСТ, %	КЕР, %
1D-15	1347	28.9	58.9	8.4	2.3	1.5	0.0	0.0	2.8	+	+
1D-15	1424	46.7	40.7	11.2	1.2	0.2	0.0	0.0	0.7	–	+++
1D-15	1483	41.8	47.0	8.2	0.6	0.9	1.5	0.0	1.6	–	+++
1D-15	1507	44.6	24.3	19.3	7.3	4.5	0.0	0.0	1.9	–	++++
1D-15	1548	42.1	24.2	32.5	0.8	0.3	0.0	0.0	1.7	–	–
1D-15	1624	38.6	60.0	1.1	0.3	0.0	0.0	0.0	5.7	–	–
1D-15	1662	19.9	52.1	23.5	3.6	0.9	0.0	0.0	2.4	–	5.4
1D-15	1697	40.9	44.5	12.6	1.6	0.4	0.0	0.0	1.2	–	++++
1D-15	1726	42.3	28.6	29.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.5	+	–
1D-15	1800	42.1	40.9	15.7	0.9	0.3	0.0	0.0	0.6	–	++
1D-15	1930	30.3	16.5	34.3	14.4	4.5	0.0	0.0	0.5	–	+
1D-15	2031	32.9	18.1	37.9	9.5	1.6	0.0	0.0	2.5		+++
1D-15	2093	31.3	20.4	25.7	9.0	12.5	1.1	0.0	0.3	+	–
1D-15	2170	28.4	18.2	27.7	12.5	12.5	0.8	0.0	0.4	–	++
1D-15	2210	27.2	25.4	36.1	7.8	3.0	0.6	0.0	0.6	+	1.3
1D-15	2221	33.8	49.4	15.6	1.3	0.0	0.0	0.0	1.9	1.9	7.8
1D-15	2254	42.5	17.9	23.6	9.0	6.3	0.7	0.0	0.3	–	–
1D-15	2321	22.4	23.6	43.4	9.1	1.5	0.0	0.0	0.6	–	++++
1D-15	2402	13.6	17.7	48.6	13.9	5.7	0.6	0.0	0.6	–	–
1D-15	2469	36.9	36.4	26.3	0.4	0.0	0.0	0.0	3.0	–	–
1D-15	2545	42.0	44.9	13.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	–	++++
1D-15	2604	28.0	36.2	35.4	0.4	0.0	0.0	0.0	3.9	–	–
1D-15	2648	36.2	33.7	29.1	1.0	0.0	0.0	0.0	0.1	–	9.0
1D-15	2670	24.1	45.5	26.5	1.2	1.9	0.8	0.0	1.4	8.2	3.3
1D-15	2712	27.6	39.4	28.0	3.6	1.4	0.0	0.0	1.4	–	+++
1D-15	2780	34.6	20.6	41.3	3.1	0.3	0.0	0.0	2.4	+++	++++
1D-15	2929	11.7	44.8	41.5	1.3	0.7	0.0	0.0	2.7	–	–
1D-15	3120	21.2	78.3	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	3.1	–	+++
1D-15	3146	36.6	53.4	6.9	2.3	0.8	0.0	0.0	0.7	2.2	12.3
1D-15	3200	40.4	58.2	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	1.9	5.8	9.7
1D-15	3248	30.7	68.4	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	2.8	–	–
1D-15	3304	32.7	24.5	18.7	17.7	6.5	0.0	0.0	0.3	–	–

Примечание. «+» – <5 зерен в пробе; «++» – 5–10 зерен в пробе; «+++» – 10–25 зерен в пробе; «++++» – >25 зерен в пробе.

Таблица 2. Интервалы и средние значения концентрации аксессуарных минералов и тяжелой фракции (в %) в донных отложениях скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15. В скобках приведено количество проанализированных образцов. * Σ_R — сумма $\text{\textcircled{p}} + \text{crdp} + \text{mgcr} + \text{ol} + \text{sh} + \text{fl} + \text{uv} + \text{pu} + \text{ph} + \text{py} + \text{mo} + \text{chr} + \text{ar} + \text{hm} + \text{cr} + \text{gh} + \text{cor} + \text{spr}$.

Компоненты	Скважина	Обозначение	1D-14 (n = 32)	3D-14 (n = 19)	1D-15 (n = 48)
Группа амфиболов		am	<u>0.00–35.9</u> 18.4	<u>1.10–53.0</u> 26.4	<u>7.10–50.0</u> 27.4
Группа пироксенов		px	<u>0.00–17.6</u> 9.47	<u>0.60–17.1</u> 10.6	<u>0.00–22.8</u> 11.2
Группа карбонатита		carb	<u>0.80–58.9</u> 18.4	<u>0.60–65.6</u> 11.4	<u>0.00–20.0</u> 2.56
Лейкоксен		lx	<u>0.00–39.0</u> 2.29	<u>0.00–7.9</u> 1.35	<u>0.10–10.0</u> 0.41
Ильменит		il	<u>0.00–18.2</u> 4.82	<u>0.00–14.0</u> 3.23	<u>0.00–18.0</u> 4.85
Рутил + Анатаз + Брукит		r+ans+brk	<u>0.00–5.00</u> 1.63	<u>0.00–3.00</u> 1.04	<u>0.00–8.80</u> 1.43
Титанит (Сфен)		sph	<u>0.00–8.50</u> 2.63	<u>0.70–10.0</u> 3.17	<u>0.00–11.0</u> 2.67
Группа эпидотов + Цоизит		ep+zo	<u>0.00–26.5</u> 10.6	<u>1.40–21.5</u> 11.7	<u>0.00–54.3</u> 15.1
Гранат		gr	<u>0.00–29.6</u> 7.20	<u>0.00–31.6</u> 5.94	<u>0.00–32.5</u> 13.6
Слюда		mc	<u>0.00–63.6</u> 9.13	<u>0.00–51.3</u> 9.37	<u>0.00–40.0</u> 2.15
Кианит (Дистен) + Сиаллит		ky+si	<u>0.00–10.7</u> 3.65	<u>1.30–22.0</u> 4.89	<u>0.00–14.0</u> 3.63
Лимонит + Гидроокислы Fe		li	<u>0.00–38.2</u> 5.00	<u>0.00–46.6</u> 5.00	<u>0.00–22.5</u> 1.90
Магнетит		mt	<u>0.00–11.1</u> 4.57	<u>0.00–8.90</u> 2.55	<u>0.00–80.0</u> 11.3
Циркон		zr	<u>0.00–2.4</u> 0.89	<u>0.00–1.80</u> 0.56	<u>0.00–7.00</u> 0.72
Апатит		ap	<u>0.00–2.20</u> 0.85	<u>0.20–2.00</u> 0.91	<u>0.00–4.00</u> 0.62
Турмалин		tu	<u>0.00–1.80</u> 0.31	<u>0.00–3.00</u> 0.60	<u>0.00–4.00</u> 0.44
Хлорит		cl	<u>0.00–2.50</u> 0.17	<u>0.00–3.00</u> 0.29	<u>0.00–0.60</u> 0.03
Ставролит		st	<u>0.00–0.80</u> 0.13	<u>0.00–0.06</u> 0.02	<u>0.00–0.50</u> 0.03
Сумма оставшихся минералов		Σ_R^*	<u>0.00–2.84</u> 0.87	<u>0.30–15.3</u> 2.52	<u>0.00–6.00</u> 1.05
Выход тяжелой фракции		ТФ	<u>0.1–3.4</u> 0.8	<u>0.1–2.1</u> 0.4	<u>0.1–5.7</u> 1.3

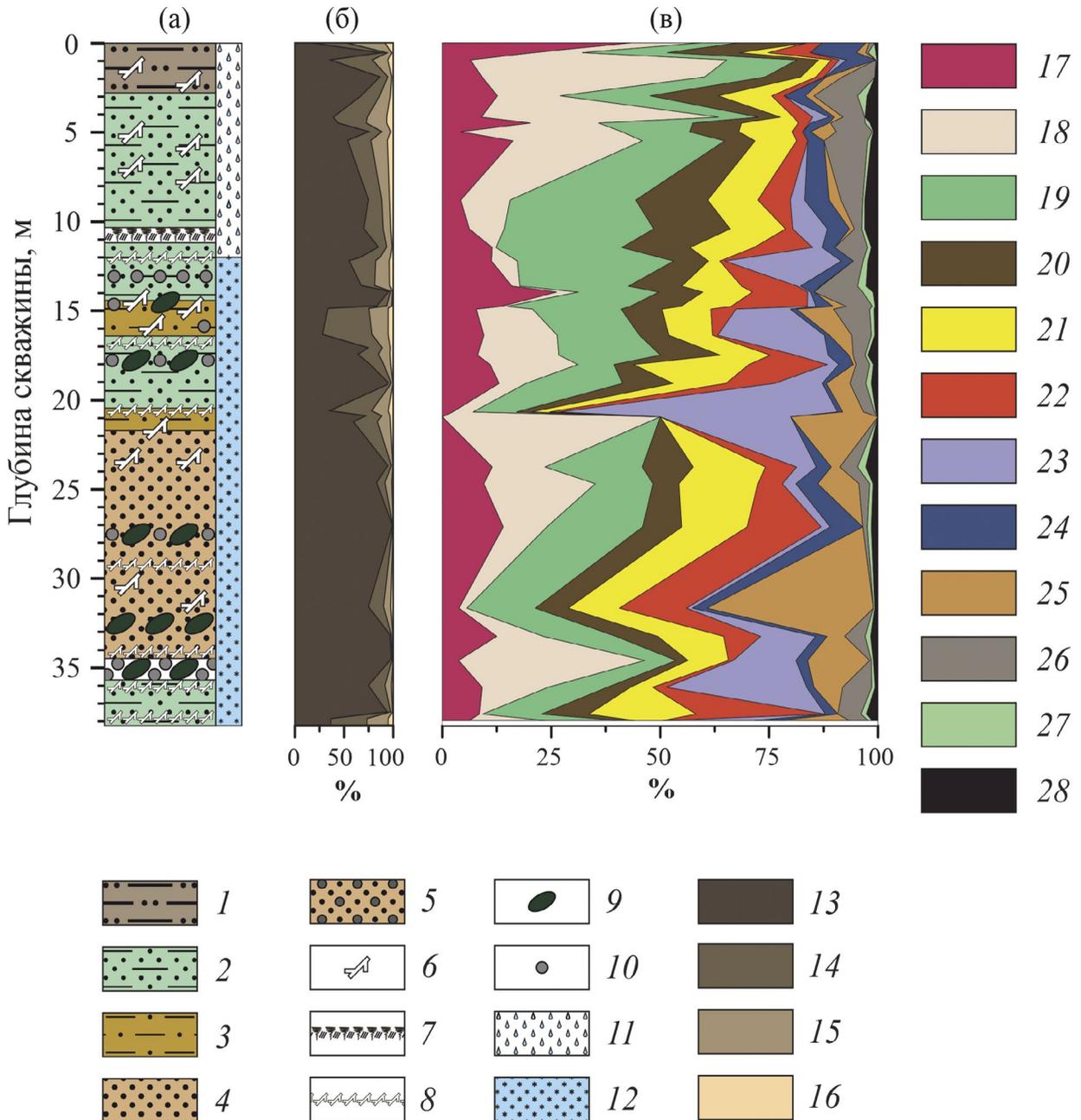


Рис. 2. Литологическое описание (а), granulометрический состав (б) и распределение процентного содержания минералов тяжелой фракции (в) отложений скважины 1D-14. Условные обозначения: 1 – ил алеврито-песчаный; 2 – песок пелитово-алевритовый; 3 – алеврит песчаный; 4 – песок; 5 – песок гравелистый; 6 – древесные остатки; 7 – слой почвенно-растительный; 8 – слой древесных остатков; 9 – галька; 10 – гравий; 11 – талые отложения; 12 – мерзлые отложения; 13 – фракция > 63 мкм; 14 – фракция 10–63 мкм; 15 – фракция 2–10 мкм; 16 – фракция < 2 мкм; 17 – r + il + lx + sph + ans + brk; 18 – carb; 19 – am; 20 – px; 21 – ep + zo; 22 – gr; 23 – mc; 24 – ky + si; 25 – li; 26 – mt; 27 – zr; 28 – tu + ap + šp + crdp + mgr + ol + cl + sh + fl + uv + pu + ph + st + py + mo + chp + ar + hm + cr + gh + cor + spr.

Надписи: Глубина скважины, м

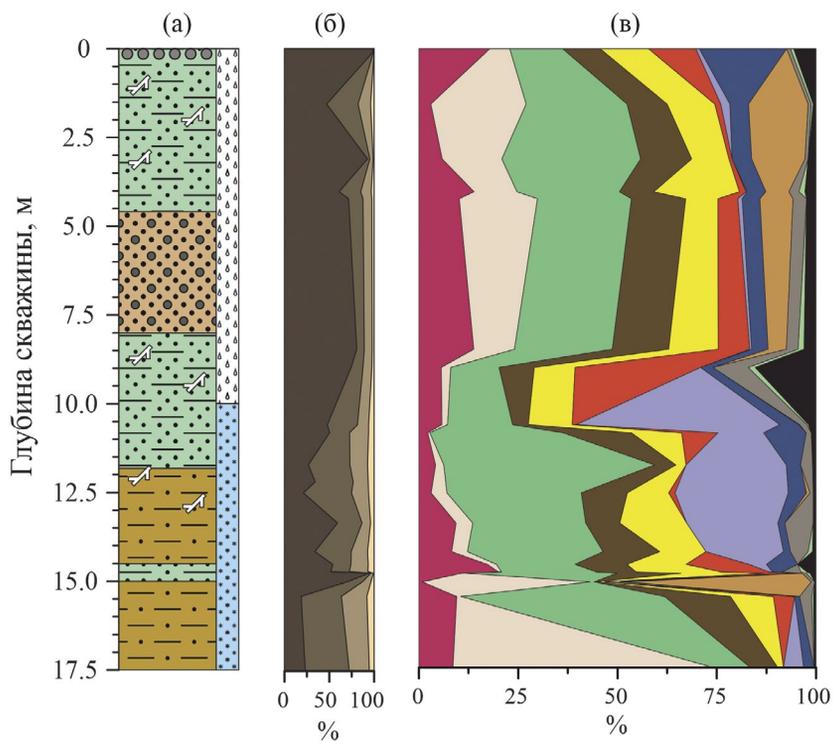


Рис. 3. Литологическое описание (а), гранулометрический состав (б) и распределение процентного содержания минералов тяжелой фракции (в) отложений скважины 3D-14. Условные обозначения приведены на рис. 2.
Надписи: Глубина скважины, м

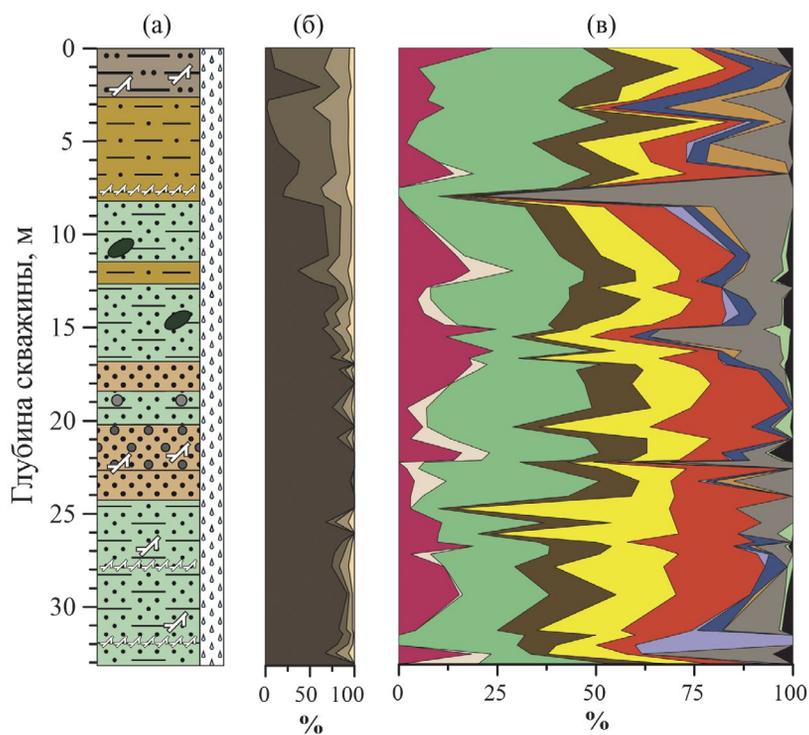


Рис. 4. Литологическое описание (а), гранулометрический состав (б) и распределение процентного содержания минералов тяжелой фракции (в) отложений скважины 1D-15. Условные обозначения приведены на рис. 2.
Надписи: Глубина скважины, м

Как отмечалось, исследованные толщи отложений обогащены остатками древесной и травянистой растительности, которые вносят значительный вклад в пул органического углерода ($C_{орг}$) [12]. Помимо растительных остатков, в исследованных образцах были обнаружены и количественно проанализированы углеподобные частицы (предположительно керогена), частично сохранившие древесную структуру (рис. 5). Они представлены угловатыми обломками от темно-серого до черного цвета со смоляным или металлическим блеском, раковистым изломом, хрупкие, небольшой твердости (2–3). При сгорании оплавляются, приобретают бурый цвет и неприятный резкий запах. Кристаллическая решетка отсутствует, что подтверждают данные рентгеноструктурного анализа. Эти частицы встречаются в отдельных сегментах и горизонтах всех трех исследованных буровых профилей в виде отдельных зерен и массовых скоплений (см. табл. 1). В легкой фракции также идентифицированы частицы графита (gp). Он обнаружен в виде единичных зерен на горизонтах 415, 1486, 1631, 2059, 3313 и 3745 см профиля 1D-14, 1080 и 1414 см профиля 3D-14 и 510, 852, 1195, 2170, 2321, 3146 и 3200 см профиля 1D-15.

ОБСУЖДЕНИЕ

Современная береговая зона губы Буор-Хая была сформирована под действием термоабразии и термокарста в результате среднеголоценовой трансгрессии моря [17, 20, 24–26]. Ивашкина лагуна Быковского полуострова представляет собой затопленную морской водой термокарстовую котловину, соединившуюся с морем на границе голоцена и плейстоцена [23, 25], а о. Муостах, расположенный юго-восточнее полуострова, является распадающимся останцем той же равнины и состоит преимущественно из верхнеплейстоценовых отложений ледового комплекса [18]. Широкое распространение отложений ледового

комплекса в исследованном районе губы Буор-Хая обуславливает значительный вклад термоабразии в поставку осадочного материала [17, 26–28]. Исследуемый район также отличается сложной и разновозрастной геологической историей, определившей широкий возрастной диапазон развитых здесь пород и отложений [1, 3, 9–11]. Протерозойские отложения, представленные алевролитами, песчаниками, доломитами, выходят на поверхность в Хараулахском хребте. Отложения верхнего палеозоя–нижнего мезозоя выходят на поверхность в Хараулахском хребте и в окрестностях пос. Тикси и объединяются в Верхоянский комплекс, в котором чередуются алевролиты, аргиллиты, песчаники, местами встречаются в виде пластов эффузивы [5]. Палеогеновые отложения представлены надугленосной толщей жирных глин, угленосной толщей, в которой чередуются пласты бурого угля с прослойками белой глины, гальки, кварца, и подугленосной толщей алевритов. Данные отложения выходят на поверхности в юго-восточной части бухты Тикси и на правом берегу Быковской протоки.

Результаты факторного анализа для исследованных минералов тяжелой фракции позволили проследить взаимосвязь их содержания в осадках (табл. 3). Первый фактор (F1) объясняет 22.0% дисперсии значений. Значимые положительные нагрузки отмечены для SiO_2 наряду с рутилом (в сумме с анатазом и брукитом), сфеном, гранатами, эпидотами (+ цоизит), цирконом, что отражает попутное поступление последних совместно с кварцевыми и/или кварц-полевошпатовыми песками, являющимися базовыми составляющими исследованных отложений. Эти минералы отличаются высокой абразивной устойчивостью и характеризуются значительной миграционной способностью. Для слюды отмечены отрицательные значения нагрузок для первых семи факторов, значимые из которых приходятся на F1 и F5. Отмеченные для карбонатитов и слюд отрицательные нагрузки здесь связаны в первую очередь



Рис. 5. Микрофотографии углеподобных частиц с горизонта 3447 см скважины 1D-14.

с их гораздо более низким содержанием в толще скважины 1D-15 по сравнению с 1D-14 и 3D-14. Это можно объяснить низкой абразивной прочностью карбонатитов и слюд и, как следствие, их незначительной миграционной способностью, а также частичным растворением этих минералов. Также могут играть роль концентрирование слюд и карбонатитов во фракциях алеврито-пелитовой размерности, специфичная для этих минералов дифференциация и динамика их поступления в осадки, отличная от близко расположенных к берегу профилей 1D-14 и 3D-14.

Второй фактор (F2) объясняет 14.8% дисперсии, и максимальные положительные нагрузки отмечены для амфиболов и пироксенов — цепогачных силикатных минералов-индикаторов магматических горных пород, скарнов, гнейсов, кристаллических сланцев. Эти группы минералов обнаружены во всех исследованных нами пробах донных отложений и мерзлых пород. Концентрация амфиболов в исследованных отложениях в 2–3 выше по сравнению с пироксенами и отражает вклад гидротермальных и магматических пород. Высокие, близкие по значению величины нагрузок наряду с относительно постоянным соотношением амфиболов и пироксенов в тяжелой фракции подтверждают ее обогащение продуктами выветривания магматических, в большинстве случаев метаморфизованных, горных пород независимо от литологической дифференциации толщ. Фактор, выделивший эту группу, может быть как концентрационный (общий вклад амфиболов и пироксенов в тяжелую фракцию ми-

нералов весьма значителен), так и генетический (концентрация амфиболов по сравнению с пироксенами всегда выше).

На долю третьего фактора (F3) выпадает 11.6% объясняемой дисперсии, и максимальные значения факторной нагрузки отмечены для суммы кианит + силлиманит и апатита. Близкие к 0.5 значения отмечены для минералов титанового ряда — сфена и лейкоксена. Кианит (дистен) и силлиманит — характерные продукты метаморфизма высокоглиноземистых осадочных пород. Силлиманит образуется в результате высокотемпературного контактового метаморфизма и характерен для кристаллических сланцев и гнейсов. Поскольку средние концентрации этих минералов в исследованных профилях близки (за исключением лейкоксена, для которого максимальная нагрузка соответствует F4), фактор, выделивший эту группу минералов, скорее не концентрационный, а генетический, отражающий родственное происхождение этих минералов, и/или литодинамический, характеризующий их попутное накопление в осадках и дифференциацию.

На оставшиеся четыре фактора (F4–F7) приходится 8.5, 7.1, 6.1 и 5.9% объясняемой дисперсии соответственно. Максимальные положительные значения нагрузок соответствуют лейкоксену, магнетиту, ильмениту и лимониту соответственно. Подобное разделение, по-видимому, объясняется различиями в миграционной способности и концентрировании этих минералов. Так, для отложений скважины 1D-15 среднее процентное

Таблица 3. Распределение значений факторных нагрузок процентного содержания акцессорных минералов и SiO₂ в донных отложениях скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15

Компонент	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
SiO ₂	0.669	0.172	-0.361	0.308	0.010	-0.071	0.070
Лейкоксен	-0.209	-0.009	0.468	0.500	0.233	0.093	-0.456
Ильменит	0.456	-0.245	0.119	-0.101	-0.040	0.643	0.201
Рутил + анатаз + брукит	0.635	-0.487	0.106	-0.077	0.020	-0.102	-0.194
Сфен	0.575	-0.275	0.493	-0.113	-0.101	-0.211	0.074
Группа карбонатита	-0.562	-0.435	-0.031	0.386	-0.081	0.286	-0.078
Группа амфиболов	0.046	0.781	0.191	-0.387	-0.012	0.017	0.143
Группа пироксенов	0.189	0.755	0.338	0.051	-0.042	0.213	-0.158
Группа эпидота + цоизит	0.659	-0.013	-0.361	0.151	-0.248	-0.049	0.070
Гранат	0.580	0.390	-0.320	0.355	-0.065	-0.128	-0.036
Слюда	-0.501	-0.128	-0.071	-0.455	-0.501	-0.252	-0.305
Дистен + силлиманит	0.047	0.069	0.704	0.241	0.177	-0.434	0.204
Лимонит + гидроокислы Fe	-0.491	-0.289	-0.106	0.272	-0.043	-0.187	0.564
Магнетит	0.090	-0.195	-0.252	-0.412	0.822	-0.029	0.006
Циркон	0.595	-0.469	0.000	-0.063	-0.032	-0.123	-0.276
Апатит	0.321	-0.286	0.528	-0.164	-0.202	0.200	0.249

содержание лейкоксена и лимонита по сравнению с 1D-14 и 3D-14 ниже в 3–5 и 2–3 раза соответственно, а вклад магнетита в тяжелую фракцию, наоборот, в 2–4 раза выше. Как уже отмечалось, для слюд характерна значимая отрицательная нагрузка не только в F1, но и в F5, и в паре с положительной нагрузкой магнетита — индикаторного минерала скарнов — такая обратная корреляция может быть объяснена концентрационной диаметральнойностью этих двух компонентов в отложениях профиля 1D-15. Ильменит, как индикатор щелочных и основных магматических пород, характеризуется хорошей абразивной устойчивостью, а его высокая встречаемость в исследованных буровых профилях и близкие между собой средние величины процентного содержания явились весомым фактором (F6) со значимой величиной нагрузки. Кроме того, достаточно высокая положительная нагрузка фактора F1 ильменита (0.456) роднит его с представителями первой факторной группы — акцессорными минералами-индикаторами магматических и метаморфических пород.

Как и в случае с различиями изотопного [12] и молекулярного [15] состава органического вещества (ОВ), вскрытые колонковым бурением в непосредственной близости к берегу толщи (1D-14 и 3D-14) схожи между собой по содержанию минералов тяжелой фракции и по ряду концентраций заметно отличаются от отложений профиля 1D-15. Это проявляется в процентном содержании карбонатитов, слюд, лимонита и хлорита, средний вклад которых ниже в разрезе. Напротив, процентное содержание граната и магнетита в отложениях 1D-15 заметно выше. Отмеченный повышенный вклад тяжелой фракции в отложениях скважины 1D-15 (ср. 1.3%), пробуренной в 20 км от берега, по сравнению с 1D-14 (ср. 0.8%) и 3D-14 (ср. 0.4%), пробуренных в непосредственной близости к континенту, по-видимому, связан с влиянием Быковской протоки, на долю которой приходится до 70% речного стока Лены, поставляющей большие количества термоабразивного осадочного материала дельтовых фаций [1–2, 8]. В данном случае Быковский полуостров выступает в роли барьера и заметно снижает влияние течений с северо-запада в области бурения скважин 1D-14 и 3D-14, тогда как профиль 1D-15 взят в открытой акватории бухты, более подверженной влиянию стока Лены. Зафиксированный тренд изменчивости состава осадочного вещества также может быть вызван (или усилен) влиянием сильных западных и северо-западных нагонных ветров, характерных для исследованной части губы Буор-Хая [4].

Несмотря на выявленную общую закономерность распределения акцессорных минералов в исследованных геологических разрезах,

дальнейший статистический анализ результатов позволил уточнить в них различия. Так, сопоставление величины факторных счетов F1 с концентрацией SiO_2 в осадках выявило нарушение этой закономерности для профиля 3D-14 (рис. 6). Для отложений скважин 1D-14 и 1D-15 наблюдается общая тенденция взаимного роста значений в паре SiO_2 -F1, а величины коэффициентов корреляции Пирсона (r) составили 0.69 и 0.63 соответственно. Это подтверждает ранее сделанный вывод о попутном поступлении в осадки ряда акцессориев с кварцевыми и кварц-полевошпатовыми песками и роднит профили 1D-14 и 1D-15 между собой. В свою очередь, для профиля 3D-14 корреляция в паре SiO_2 -F1 заметно ослабевает ($r = 0.31$) и теряется ее линейность, что не согласуется с общей закономерностью накопления акцессорных минералов по фактору F1.

Для уточнения минералогических различий между исследованными профилями был проведен анализ корреляции между величинами счетов первых семи факторов (F1–F7), ранее выделенных по результатам факторного анализа, с процентным вкладом минералов и SiO_2 в каждом образце (табл. 4–6). Для отложений скважины 1D-14 положительная значимая корреляция ($r \geq 0.5$) для F1 отмечена для SiO_2 , рутила, сфена, эпидота, граната, циркона, менее значимая — для амфиболов, пироксенов и апатита. Отрицательная корреляция характерна для карбонатитов и слюд. Эти корреляции хорошо согласуются с результатами факторного анализа, отличие лишь в большем родстве амфиболов, пироксенов и апатита с содержанием SiO_2 , что может быть следствием их относительно большего поступления в составе песков. Для F2 положительная корреляция отмечена для амфиболов и пироксенов, что полностью согласуется с результатами факторного анализа. В диапазоне F3–F7 корреляция между счетами и концентрацией компонентов сильно отличается от результатов факторного анализа за исключением ильменита (F6), лейкоксена (F4), лимонита (F7) и кианита (F3). Подобная картина, вероятнее всего, связана с различиями в генезисе, миграционной способности и концентрировании акцессориев.

Как уже упоминалось, отложения скважины 1D-15, как и 1D-14, характеризуются положительной значимой корреляцией F1 с SiO_2 . В эту же группу вошли рутил, сфен, эпидот и циркон, что указывает на их миграцию преимущественно вместе с песками. Отрицательная корреляция отмечена для амфиболов. Для F2, как и в случае с 1D-14, значимая положительная связь характерна для амфиболов и пироксенов, однако появляется и отрицательная — с рутилом, сфеном и цирконом. Подобное разделение, по-видимому, обусловлено гидродинамическим фактором.

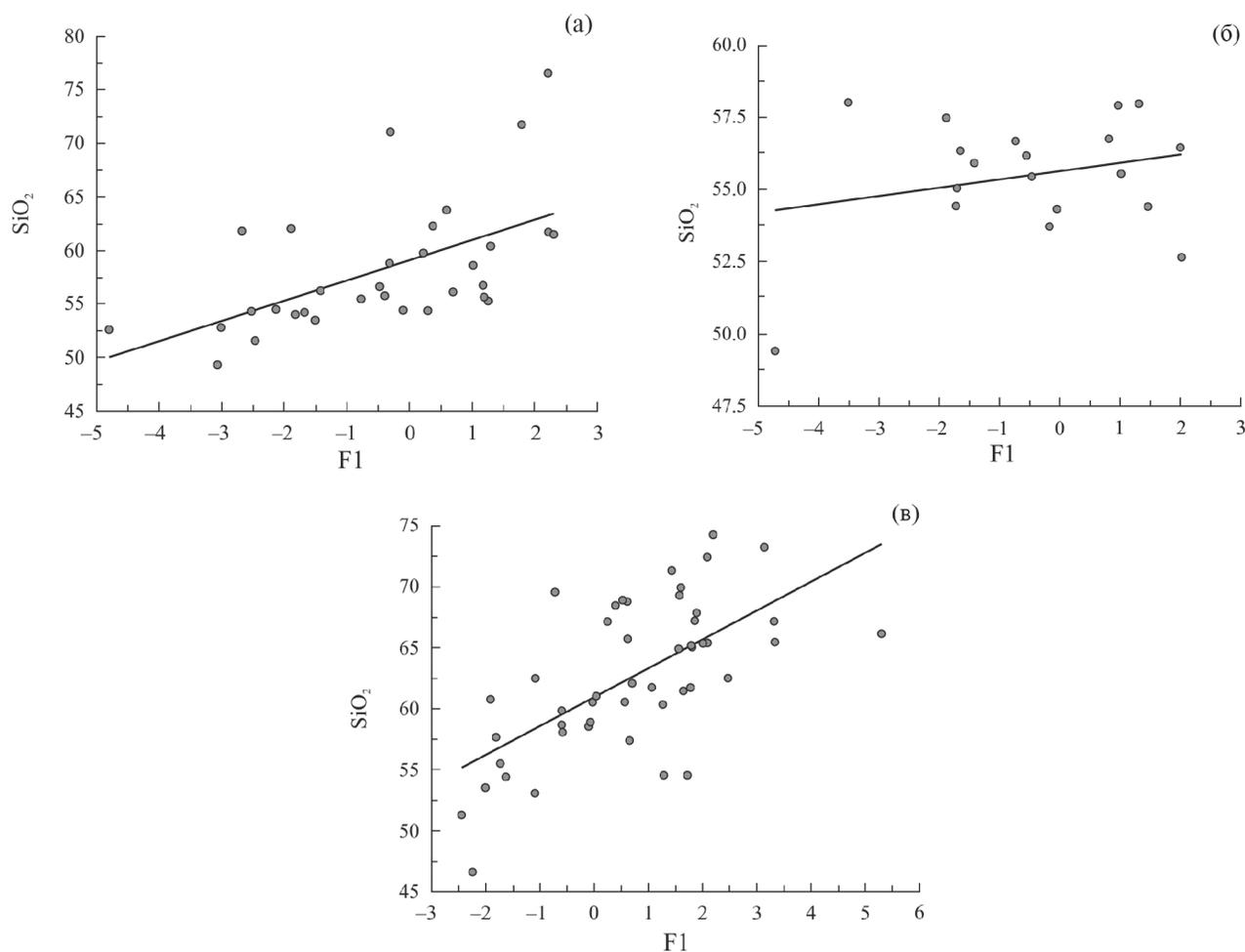


Рис. 6. Диаграммы SiO₂-F1 проанализированных образцов из скважин 1D-14 (а), 3D-14 (б) и 1D-15 (в).

Таблица 4. Распределение значений коэффициентов корреляции Пирсона факторных счетов с содержанием минералов и SiO₂ в донных отложениях скважины 1D-14 (n = 32).

Компонент	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
SiO ₂	0.692	0.157	-0.230	0.201	-0.098	-0.254	0.418
Лейкоксен	-0.217	0.235	0.718	0.644	0.710	0.167	-0.737
Ильменит	0.464	-0.025	0.000	-0.224	0.221	0.664	0.003
Рутил + анатаз + брукит	0.786	-0.019	0.056	-0.218	-0.033	-0.024	0.217
Сфен	0.718	0.232	0.324	-0.141	0.037	-0.237	0.051
Группа карбонатита	-0.624	-0.605	-0.223	0.323	0.150	0.347	-0.063
Группа амфиболов	0.503	0.693	0.388	-0.484	-0.014	0.100	0.186
Группа пироксенов	0.499	0.843	0.667	0.050	0.485	0.177	-0.229
Группа эпидота + цоизит	0.769	0.261	-0.253	-0.012	-0.135	-0.173	0.370
Гранат	0.703	0.443	-0.203	0.219	0.043	-0.251	0.214
Слюда	-0.519	-0.341	-0.286	-0.539	-0.731	-0.410	-0.163
Дистен + силлиманит	0.194	0.398	0.788	0.498	0.524	-0.244	-0.304
Лимонит + гидроокислы Fe	-0.425	-0.318	-0.418	0.190	-0.237	-0.440	0.576
Магнетит	0.374	-0.008	-0.055	-0.387	0.216	0.524	0.010
Циркон	0.751	0.127	0.194	-0.326	-0.024	0.009	0.081
Апатит	0.506	0.316	0.444	-0.273	-0.059	-0.029	0.105

Таблица 5. Распределение значений коэффициентов корреляции Пирсона факторных счетов с содержанием минералов и SiO₂ в донных отложениях скважины 3D-14 (*n* = 19).

Компонент	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
SiO ₂	0.307	0.275	0.260	0.571	-0.445	0.210	-0.405
Лейкоксен	-0.086	0.819	0.063	0.259	-0.060	0.250	0.415
Ильменит	0.538	-0.237	-0.275	0.056	0.520	0.413	-0.006
Рутил + анатаз + брукит	0.808	0.118	-0.315	-0.051	-0.070	-0.045	0.233
Сфен	0.656	0.396	0.177	-0.397	0.016	-0.072	0.164
Группа карбонатита	-0.708	0.432	-0.342	0.369	0.040	0.192	0.026
Группа амфиболов	0.183	-0.556	0.662	0.238	0.126	-0.110	-0.008
Группа пироксенов	0.524	-0.166	0.389	0.494	0.258	-0.342	0.128
Группа эпидота + цоизит	0.755	-0.203	-0.011	-0.061	0.338	0.209	0.027
Гранат	0.629	0.149	-0.402	0.045	-0.389	-0.396	0.107
Слюда	-0.291	-0.302	0.441	-0.548	-0.373	0.343	0.084
Дистен + силлиманит	0.322	0.705	0.309	-0.299	0.012	-0.220	-0.277
Лимонит + гидроокислы Fe	-0.618	0.051	-0.504	-0.194	0.373	-0.297	-0.232
Магнетит	0.404	-0.494	-0.378	-0.067	-0.510	0.039	-0.053
Циркон	0.644	-0.159	-0.503	0.108	-0.072	0.178	-0.171
Апатит	0.606	0.546	0.166	-0.216	0.211	0.167	-0.272

Таблица 6. Распределение значений коэффициентов корреляции Пирсона факторных счетов с содержанием минералов и SiO₂ в донных отложениях скважины 1D-15 (*n* = 48).

Компонент	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
SiO ₂	0.632	-0.039	-0.328	0.632	-0.260	0.017	-0.170
Лейкоксен	-0.155	0.076	0.137	0.332	0.023	-0.090	0.012
Ильменит	0.453	-0.421	0.297	-0.027	-0.182	0.655	0.399
Рутил + анатаз + брукит	0.702	-0.701	0.159	-0.083	0.010	-0.200	-0.381
Сфен	0.626	-0.566	0.497	-0.093	-0.145	-0.079	0.113
Группа карбонатита	-0.098	0.173	-0.039	0.145	-0.130	0.251	-0.108
Группа амфиболов	-0.566	0.757	0.313	-0.032	-0.122	0.008	0.170
Группа пироксенов	-0.240	0.752	0.237	0.232	-0.350	0.272	-0.173
Группа эпидота + цоизит	0.590	-0.279	-0.486	0.452	-0.426	-0.020	-0.087
Гранат	0.316	0.321	-0.356	0.678	-0.467	-0.010	-0.249
Слюда	-0.445	0.178	-0.095	-0.339	-0.296	-0.086	-0.373
Дистен + силлиманит	-0.101	0.030	0.643	0.128	0.157	-0.407	0.495
Лимонит + гидроокислы Fe	-0.403	-0.016	0.252	0.110	0.162	-0.187	0.539
Магнетит	-0.153	-0.443	-0.207	-0.641	0.914	-0.110	-0.023
Циркон	0.703	-0.662	-0.041	-0.021	-0.050	-0.273	-0.451
Апатит	0.382	-0.427	0.506	-0.218	-0.198	0.409	0.404

В точке бурения скважины 1D-15 влияние Быковской протоки значительно выше, тогда как Ивашкина лагуна, в которой пробурена скважина 1D-14, отгорожена от влияния стока Лены массивом Быковского полуострова. Кроме того, песчаные отложения профиля 1D-15 отличаются лучшей сортировкой [14], что может быть следствием воздействия течений, приведших к селективной дифференциации амфиболов и пироксенов в песчаных толщах. Вторая значимая корреляция SiO_2 отмечена с F4 наряду с гранатом, отрицательная — с магнетитом. Корреляция значений счетов F3, F5, F6 и F7 совпадает с результатами факторного анализа и частично соответствует отложениям профиля 1D-14. Для лейкоксена, карбонатита и слюд значимой корреляции с факторными счетами F1–F7 не выявлено.

Для отложений скважины 3D-14 для F1 значимая положительная корреляция выявлена для рутила, сфена, эпидота, граната и циркона, в меньшей степени — для ильменита и пироксенов. Отрицательная связь наблюдается для карбонатита и лимонита. В целом, такая картина хорошо согласуется с общими результатами факторного анализа и похожа на распределение минералов в профилях 1D-14 и 1D-15, но с одним исключением — весьма слабой корреляцией с SiO_2 . Начиная с F2, общая картина корреляции факторных счетов с концентрацией компонентов не согласуется с результатами факторного анализа. F2 положительно коррелирует с лейкоксомом, дистеном и апатитом, отрицательно — с амфиболами. Для F3, F4 и F5 выявлены по одной значимой положительной связи — с амфиболами, SiO_2 и ильменитом соответственно. Отрицательная корреляция отмечена, соответственно, для лимонита, слюд и магнетита. Для F6 и F7 значимая корреляция вовсе отсутствует. Выявленное для профиля 3D-14 несоответствие общей картине распределения минералов в исследованных отложениях вызвано рядом причин.

Литологически профиль 3D-14, взятый в непосредственной близости от мыса Муостах, заметно отличается от 1D-14 и 1D-15. В целом, отложения здесь характеризуются более низким вкладом песка, а мерзлая толща обогащена пылеватым ледово-лессовым материалом, характерным для криогенного сингенеза. В пользу сингенетического происхождения этих отложений говорит присутствие в оттаявшем сегменте керна таберальных образований — продуктов постгляциальной трансформации ледового комплекса, а также криотурбационная текстура мерзлой толщи. Такого рода отложения широко распространены в пределах Северной Якутии [3, 5, 8] и формируются в условиях нивального климата, характерного для периодов оледенений [19]. Основным механизмом осадконакопления в этом случае является

ветровой перенос твердого осадочного материала. Пачка талых отложений скважины 3D-14, в свою очередь, представлена уже продуктами термоабразии, активно поступающими с о. Муостах [18]. В них содержится гораздо больше песка, встречается гравийный материал и почвенно-растительные включения. Таким образом, основным фактором, статистически отделившим профиль 3D-14 от 1D-14 и 1D-15, является, скорее всего, палеогеографический, связанный с колебаниями климата и сменой обстановок литогенеза.

По результатам обработки данных методом главных компонент в проанализированных образцах удалось выделить четыре типа минеральных ассоциаций (рис. 7). К первому типу (I) можно отнести группу SiO_2 -sph-gr-il-(ep+zo)-zr-g. Для нагрузок этих компонентов характерны высокие (>3) значения PC1, что хорошо согласуется с результатами факторного анализа, позволившими отнести компоненты этой группы к первому фактору. В эту же группу следует отнести ap, поскольку значение PC1 для него близко к 3, однако апатит, наряду с кианитом, по результатам факторного анализа отнесен к третьему фактору. Однако последующий корреляционный анализ подтвердил сродство апатита группе компонентов первого фактора. Отдельной подгруппой можно выделить zr-g, значения PC1 и PC2 для которых весьма близки, поэтому их нагрузки расположились на диаграмме обособленно. Циркон и рутил в исследованных отложениях характеризуются относительно постоянным взаимным вкладом в тяжелую фракцию на протяжении всей истории осадконакопления вскрытых бурением толщ, что связано с высокой устойчивостью этих минералов к агентам выветривания. Также отдельной подгруппой можно считать ap-il-sph, также сформировавших обособленную область на диаграмме главных компонент. Скорее всего, это связано с генетическим родством этих минералов-индикаторов щелочных магматических пород.

Факторные нагрузки отнесенных к типу I компонентов близки между собой по величине PC1, но весьма различаются по PC2, что указывает на влияние второго фактора — амфиболов и пироксенов, отнесенных к типу II и оказавших заметное влияние на расположение нагрузок остальных компонентов и факторных счетов исследованных образцов. Нагрузки am и rx отличаются максимальными (>6) значениями PC2 и расположились на диаграмме изолированно от остальных в верхней части. Это обстоятельство указывает на общее, отличное от остальных минеральных ассоциаций, происхождение пироксенов и амфиболов и их относительно постоянный взаимный вклад, а также высокую (более трети) суммарную массовую долю в тяжелой фракции. По-видимому, первые два фактора, разделивших

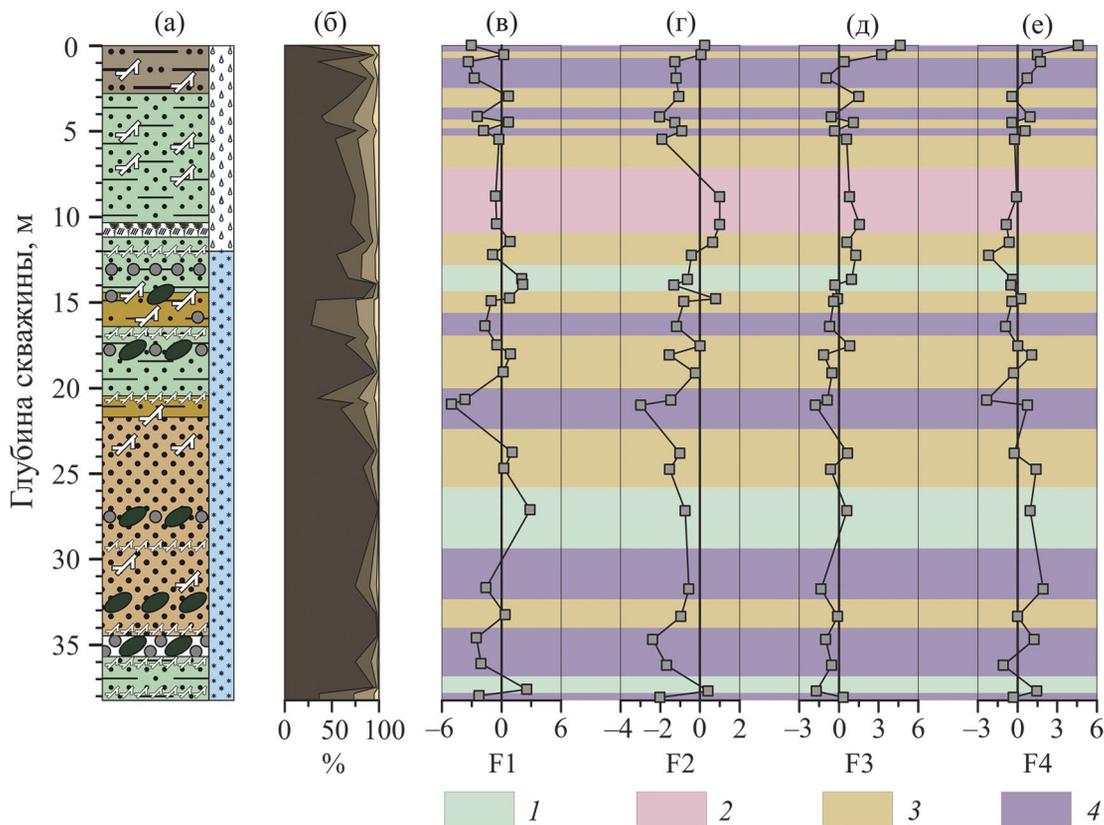


Рис. 7. Минералогическая дифференциация профиля 1D-14 по выделенным типам минеральных ассоциаций. а — литологическое описание; б — гранулометрический состав; в-е — распределение величины факторных счетов F1-F4. 1 — тип I; 2 — тип II; 3 — тип III; 4 — тип IV.

выделенные минеральные ассоциации, являются одновременно и генетическими, и концентрационными. Как видно на диаграмме, к I и II типам минеральных ассоциаций относятся преимущественно образцы профиля 1D-15, в меньшей степени 3D-14, и несколько образцов 1D-14. В табл. 7 представлено соответствие проанализированных горизонтов выделенным типам минеральных ассоциаций, а распределение выделенных типов минеральных ассоциаций по исследованному профилю представлено на рисунках 8–10.

К типу III следует отнести группу $lx-mt-(ky+si)$, нагрузки которых отличаются наиболее близкими к нулю значениями PC1 и PC2, и точки, соответствующие нагрузкам этих компонентов, сосредоточены в центре диаграммы. Кианит, лейкоксен и магнетит по результатам факторного анализа отражают влияние факторов F3, F4 и F5 соответственно. В случае лейкоксена и магнетита это, безусловно, концентрационный фактор — для отложений профиля 1D-15 среднее содержание этих минералов в разы ниже (лейкоксен) или выше (магнетит) по сравнению с 1D-14 и 3D-14. Средний вклад суммы кианит + силлиманит

между профилями меняется незначительно, что позволяет предположить общий для изученных толщ отложений источник их поступления. Четвертый (IV) тип ассоциаций включил в себя группу минералов $mc-li-carb$, отличающихся отрицательными значениями PC1 и PC2 (для PC1 наименьшие величины). Эти нагрузки расположились на диаграмме в нижнем левом углу.

Примечательно, что к III и IV типам минеральных ассоциаций отнесена основная доля образцов скважин 1D-14 и 3D-14, пробуренных в непосредственной близости к континенту, что роднит между собой отложения этих геологических профилей по набору минералогических индикаторов. Средний процентный вклад карбоната в отложениях 1D-14 и 3D-14 в разы больше по сравнению с 1D-15, и закономерность его концентрирования и распределения в исследованных толщах связана скорее с географическим и гидродинамическим факторами. Как уже упоминалось ранее, к ним относятся схожесть палеогеографических обстановок осадконакопления и источников поступления карбоната, а также влияние региональной гидродинамики, связан-

Таблица 7. Соответствие проанализированных горизонтов (см) выделенным типам минеральных ассоциаций

Скважина	Тип I	Тип II	Тип III	Тип IV
1D-14	1358, 1391, 2701, 3745	878, 1039	55, 296, 448, 546, 1142, 1218, 1471, 1486, 1743, 1796, 1901, 2366, 2460, 3313	0, 96, 190, 415, 496, 1631, 2059, 2087, 3154, 3447, 3597, 3782
3D-14	10, 896	310, 1057, 1080, 1170, 1249, 1475, 1540	402, 422, 845, 1334, 1414, 1450, 1471	155, 1499, 1740
1D-15	0, 852, 1114, 1195, 1249, 1347, 1483, 1507, 1548, 1624, 1662, 1697, 1726, 1800, 2031, 2170, 2469, 2545, 2604, 2780, 2929, 3120	110, 210, 280, 395, 510, 612, 675, 750, 1284, 1424, 1930, 2093, 2210, 2254, 2321, 2402, 2648, 2712, 3146, 3200, 3304	нет	321, 794

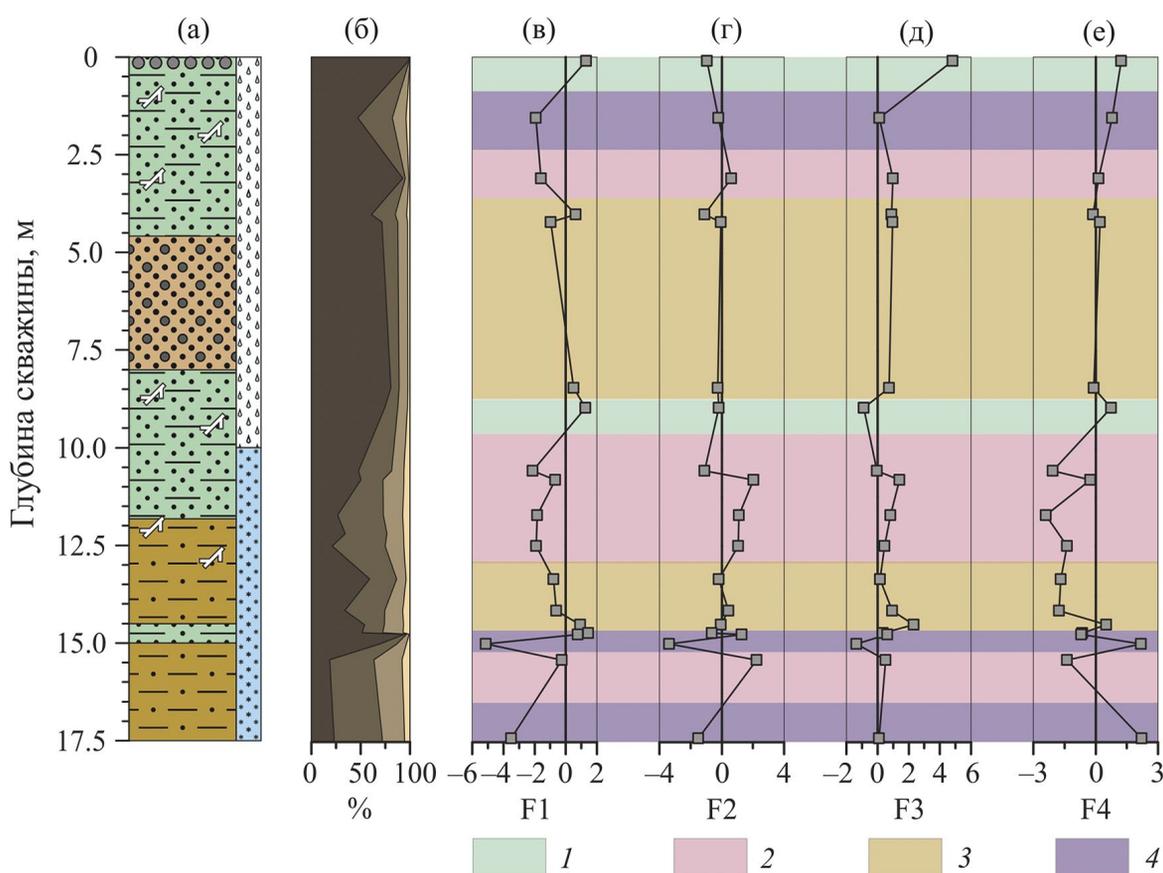


Рис. 8. Минералогическая дифференциация профиля 3D-14 по выделенным типам минеральных ассоциаций. Условные обозначения см. рис. 7.

ное с барьерным эффектом Быковского полуострова в зоне бурения скважин 1D-14 и 3D-14. Это же утверждение справедливо для слюд и лимонита, наряду с карбонатитом, отнесенных к IV типу минеральных ассоциаций, а также для лейкоксена, нагрузка которого близко расположена к IV типу.

Для уточнения роли эолового переноса в пространстве осадочного материала была исследована проба песчаных наносов, сформированных на ледовой поверхности акватории губы весной 2014 г. под влиянием сильного ветра (рис. 11). Проба представлена хорошо сортированными крупнозернистыми песками (1–2.5 мм — 69.0%;

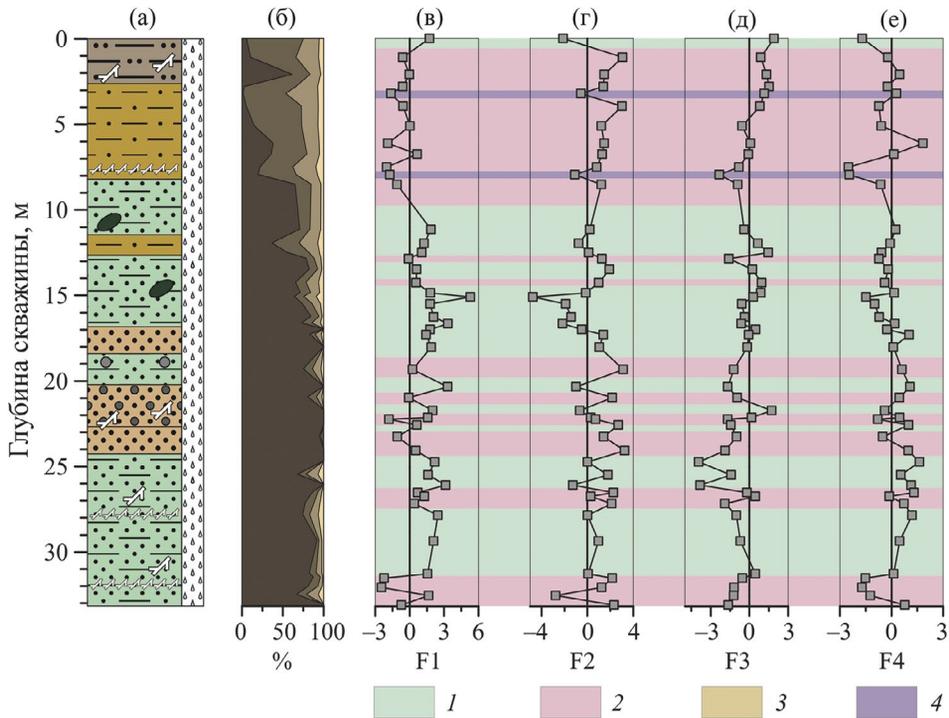


Рис. 9. Минералогическая дифференциация профиля 1D-15 по выделенным типам минеральных ассоциаций. а — литологическое описание; б — гранулометрический состав; в — распределение величины факторных счетов F1-F4. 1 — тип I; 2 — тип II; 3 — тип III; 4 — тип IV.

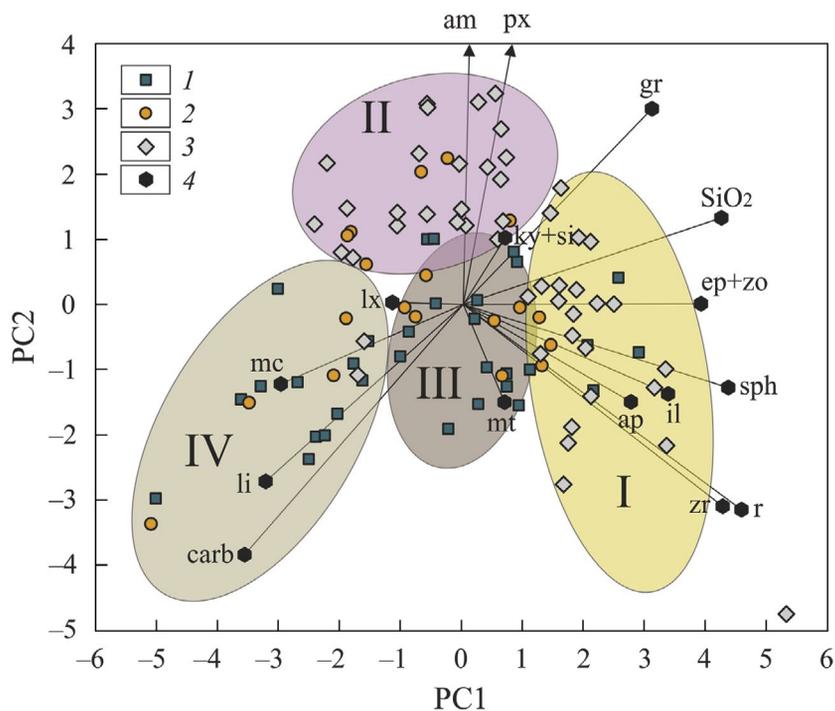


Рис. 10. Диаграмма первой (PC1) и второй (PC2) главных компонент проанализированных образцов. Точки am и px соответствуют координатам 1.02; 6.14 и 0.07; 6.22 соответственно. 1 — образцы скважины 1D-14; 2 — образцы скважины 3D-14; 3 — образцы скважины 1D-15; 4 — факторные нагрузки соответствующих компонентов.

0.5–1 мм — 28.1%; 0.25–0.5 мм — 2.9%). По результатам минералогического анализа эти наносы представлены кварцем (70%) в смеси с полевыми шпатами (плагиоклазы), слюдой и хлоритом, соответствующими широко распространенным здесь алевролитам, песчаникам и аргиллитам. Это подтверждает, что климатически опосредованные ветровые процессы играют существенную роль в распространении и сортировке осадочного материала в северной Якутии, источником которого являются обнажения распространенных здесь осадочных пород. Этот же механизм лежит в основе распространения органических компонентов (растительных остатков, почв, торфа и др.) и дефляции ледового комплекса.

Выявленная в результате исследования изменчивость минерального состава исследованных реликтовых толщ многолетнемерзлых и талых отложений связана с динамикой потоков осадочного вещества и механизмов седиментации. Разнообразие литологических и криогенных типов исследованных отложений в совокупности с минералогическими данными отражает сложную историю формирования буорхаинской свиты и обусловлено сменой географических обстановок осадконакопления в результате колебаний климата, определивших изменчивость седиментационных потоков в условиях прибрежного литогенеза. Зафиксированная изменчивость минерального состава исследованных реликтовых толщ отражает пульсирующую динамику осадконакопления в юго-западной части губы Буор-Хая.

Основными механизмами седиментации на разных временных этапах здесь были речной сток, термоабразия берегов и эоловый перенос осадочного вещества. Свойственная поверхностным донным осадкам исследованной части губы Буор-Хая термоабразионная поставка акцессорных минералов [7], очевидно, играла одну из ведущих ролей в осадконакоплении в позднечетвертичное время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из строения современного рельефа и орографических особенностей исследованной части бухты Буор-Хая, полученные данные по минеральному составу донных отложений и многолетнемерзлых пород позволили заключить, что основой петрофонда исследованных толщ, вероятнее всего, служат осадочные породы Хараулахского хребта Верхоянской горной системы, а также поступающие с речным стоком Лены продукты термоабразии слагающих ее едомных отложений и горных пород. Преимущественно это песчаники, алевролиты и аргиллиты. Присутствие в исследованных отложениях углеподобных частиц в виде отдельных зерен и скоплений, по-видимому, вызвано спорадической разгрузкой угленосных толщ, выходящих на поверхность в юго-восточной части бухты Тикси и на правом берегу Быковской протоки. Присутствие в отложениях специфических акцессорных минералов



Рис. 11. Песчаные наносы на заснеженной ледовой поверхности губы Буор-Хая (фото автора).

маркирует разгрузку магматических и метаморфических горных пород, но их вклад незначителен и носит строго подчиненный характер.

Несмотря на выявленную в результате факторного анализа общую картину распределения акцессорных минералов в исследованных талых и многолетнемерзлых толщах, для каждого из изученных геологических профилей установлена своя специфика. Общее для исследованных отложений сродство минералов по фактору F1, по-видимому, указывает на единый источник их поступления, а различия в накоплении и распределении акцессориев в изученных реликтовых толщах связано уже скорее с пространственной динамикой процессов осадконакопления. Толщи профилей 1D-14 и 1D-15 сложены преимущественно песчаным аллювием, и определяющим фактором осадконакопления для них была динамика речного стока, с которым и поставлялась основная часть акцессорных минералов. Различия в этих профилях обусловлены географическим положением пробуренных скважин. 1D-14 пробурена непосредственно в Ивашкиной лагуне, и массив Быковского полуострова в данном случае служит барьером, снижающим влияние речной разгрузки Лены. 1D-15 в свою очередь пробурена в более открытой части губы Буор-Хая и более подвержена влиянию стока Быковской протоки. Заметное же отличие профиля 3D-14 от двух других заключается в доминировании здесь криогенных сингенетических отложений, основным движущим механизмом накопления которых был эоловый перенос. В этих отложениях отмечен минимальный вклад акцессорных минералов, что, по-видимому, связано с ветровой сортировкой тяжелой фракции. Уже в поздне-постледниковое время движущей силой осадконакопления становится термоабразия береговой зоны губы Буор-Хая, в результате чего верхние пачки исследованных толщ сложены плохо сортированными полимиктовыми отложениями. Тем не менее отложения скважин 1D-14 и 3D-14, пробуренных в близости к суше, роднит схожий количественный состав ряда акцессорных минералов, что указывает на единство источников их поступления.

Благодарности. Автор выражает благодарность д.г.н., член-корреспонденту РАН И.П. Семилетову, д.г.-м.н. О.В. Дудареву, д.г.н. М.Н. Григорьеву, к.г.-м.н. В.Е. Тумскому и членам команды Тиксинской Гидрографической базы за организацию проведенных экспедиций и возможность участия в них. Автор признателен рецензенту за полезные замечания и ценные рекомендации.

Источники финансирования. Минералогический анализ проб выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-10044). Обобщение результатов проведено в рамках Госзадания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаинов Д.Ю., Макаров А.С., Шнайдер В. и др.* Происхождение и развитие дельты реки Лены. СПб.: ААНИИ, 2013. 268 с.
2. *Деркачев А.Н., Николаева Н.А.* Минералогические индикаторы обстановок приконтинентального осадкообразования западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2010. 321 с.
3. *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.
4. *Каплин П.А., Селиванов А.О.* Изменение уровня морей России и развитие берегов. М: ГЕОС, 1999. 299 с.
5. *Куницкий В.В.* Криолитология низовья Лены. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1989. 164 с.
6. *Никифоров С.Л., Лобковский Л.И., Дмитриевский Н.Н. и др.* Ожидаемые геолого-геоморфологические риски по трассе Северного морского пути // Докл. РАН. 2016. Т. 466. № 2. С. 218–220.
7. *Николаева Н.А., Деркачев А.Н., Дударев О.В.* Особенности минерального состава осадков шельфа восточной части моря Лаптевых и Восточно-Сибирского моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 4. С. 529–538.
8. *Романовский Н.Н.* Основы криогенеза литосферы. М.: Изд-во МГУ, 1993. 336 с.
9. *Русанов Б.С., Бороденкова З.Ф., Гончаров В.Ф. и др.* Геоморфология Восточной Якутии. Якутск: Якуткнигоиздат, 1967. 376 с.
10. 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.
11. *Слагода Е.А.* Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень: Экспресс, 2004. 119 с.
12. *Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Дударев О.В. и др.* Концентрация, изотопный и элементный состав органического вещества в субаквальных талых и многолетних отложениях губы Буор-Хая // Океанология. 2022. Т. 62. № 4. С. 564–577.
13. *Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Дударев О.В. и др.* Литолого-геохимическая характеристика морфолитогенеза в губе Буор-Хая // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 407–417.
14. *Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Привар Ю.О.* Гранулометрические характеристики донных отложений губы Буор-Хая // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 452–465.
15. *Ульянцев А.С., Прокуда Н.А., Стрельцова Е.А. и др.* Геохимическая типизация органического веще-

- ства донных отложений по молекулярному составу предельных алифатических углеводородов // *Океанология*. 2021. Т. 61. № 5. С. 822–830.
16. Юдович Я.Э., Кемпус М.П. Минеральные индикаторы литогенеза. Сыктывкар: Гео-принт, 2008. 564 с.
 17. 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.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Martens J., Romankevich E., Semiletov I. et al. CASCADE — The Circum-Arctic Sediment Carbon DatabasE // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13. P. 2561–2572.
 22. 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.
 23. 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.
 24. 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.
 25. 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.
 26. 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.
 27. Schirrmeister L., Grigoriev M.N., Strauss J. et al. Sediment characteristics of a thermokarst lagoon in the northeastern Siberian Arctic (Ivashkina Lagoon, Bykovsky Peninsula) // *Arctos*. 2018. V. 4. P. 13.
 28. Schirrmeister L., Schwamborn G., Overduin P.P. et al. Yedoma Ice Complex of the Buor Khaya Peninsula (southern Laptev Sea) // *Biogeosciences*. 2017. V. 14. P. 1261–1283.
 29. 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.
 30. 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.
 31. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O. et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf // *Nature Communications*. 2017. V. 8. P. 15872.
 32. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C. et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release // *Nature*. 2019. V. 569. P. 32–34.
 33. 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. P. 5057.
 34. Winterfeld M., Mollenhauer G., Dumann W. et al. Deglacial mobilization of pre-aged terrestrial carbon from degrading permafrost // *Nature Communications*. 2018. V. 9. P. 3666.
 35. Zimov S.A., Davydov S.P., Zimova G.M. et al. Permafrost carbon: Stock and decomposability of a globally significant carbon pool // *Geophys. Res. Lett.* 2006. V. 33. L20502.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE MINERAL ASSOCIATIONS IN THE SEDIMENTS FROM BUOR-KHAYA BAY

A. S. Ulyantsev*

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: uleg85@gmail.com*

According to the results of analysis of 99 samples of bottom sediments and submarine permafrost from wells 1D-14, 3D-14 and 1D-15 drilled in the Buor-Khaya Bay, differences in their mineral composition due to paleogeographic factors, namely Late Quaternary changes in climate and sea level, as well as regional hydrodynamics are shown. The basis of the light fraction of minerals was quartz and feldspar (mainly plagioclases), found in the form of grains of various dimensions and sorting degree, as well as fine grains. To a lesser extent, the presence of chlorites, kaolinite and serpentines is noted, illite and smectite are rare. 42 accessory minerals were identified in the heavy fraction (average yield 0.95%) concentrated in fine-grained sands. It mainly consists of pyroxenes, amphiboles, carbonatite, epidote, zoisite, magnetite, mica, garnet, limonite, sphene, leucoxene, ilmenite. Rutile, kyanite, sillimanite, zircon, tourmaline, apatite, and staurolite were found in smaller quantities. In the studied strata, plant remnants and carbon-like particles (kerogen) are found, the contribution of which exceeds 5% by weight in a number of samples. The results of the study allowed to conclude that the basis of the petrofund of the studied deposits are most likely sedimentary rocks of the Kharaulakh ridge of the Verkhoyansk mountain system (sandstones, siltstones and mudstones). The presence of characteristic accessory minerals in the sediments marks the unloading of igneous and metamorphic rocks, but their contribution is subordinate. They probably also include rocks of the Verkhoyansk complex, common near the Tiksi.

Keywords: Arctic, shelf, bottom sediments, subsea permafrost, minerals, source rocks, factor analysis