

УДК 550.42

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-6-44-54

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ГУБЫ БУОР-ХАЯ (МОРЕ ЛАПТЕВЫХ)

Александр Сергеевич Ульянов^{1✉}, Наталья Владимировна Полякова²

¹ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия; uleg85@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

² Институт химии ДВО РАН, Владивосток, Россия; nvpolyakova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6596-9205>

Аннотация. В статье обобщены данные по элементному составу донных отложений и многолетнемерзлых пород из скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15, пробуренных с припайного льда в губе Буор-Хая моря Лаптевых в 2014–2015 гг. По результатам определения процентного содержания SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MgO, Na₂O, K₂O, CaO, MnO, P₂O₅, Cl, Cr, S, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Ba, Y, Zr, C_{орг} в осадках были рассчитаны значения индикаторных литохимических модулей и выполнен сравнительный анализ литолого-геохимического состава. Были установлены различия литохимического состава между прибрежными (1D-14 и 3D-14) и относительно отдаленными от суши (1D-15) толщами, объясняемые пространственно-временной изменчивостью потоков осадочного вещества и активности кор выветривания в исследованном районе моря Лаптевых. Основываясь на геологическом строении, полученные данные по литохимическому составу талых и многолетнемерзлых отложений позволили заключить, что основой петрофонда толщ вероятнее всего являются осадочные горные породы Хараулахского хребта Верхоянской горной системы, соответствующие песчаникам, алевролитам и аргиллитам. Вклад магматических и метаморфических горных пород в поставку осадочного вещества во вскрытых бурением толщах незначителен и носит подчиненный характер.

Ключевые слова: Арктика, донные отложения, подводная мерзлота, элементный состав, литохимические модули, факторный анализ

Для цитирования: Ульянов А.С., Полякова Н.В. Характеристика элементного состава донных отложений и многолетнемерзлых пород губы Буор-хая (море Лаптевых) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 6. С. 44–54.

ELEMENTAL COMPOSITION OF BOTTOM SEDIMENTS AND PERMAFROST DEPOSITS FROM THE BUOR-KHAYA BAY (LAPTEV SEA)

Aleksandr S. Ulyantsev^{1✉}, Natalya V. Polyakova²

¹ Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; uleg85@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-2230-1069>

² Institute of Chemistry, Far Eastern Branch of the RAS, Vladivostok, Russia; nvpolyakova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6596-9205>

Abstract. The paper summarizes data on the lithological and elemental composition of bottom sediments and permafrost from boreholes 1D-14, 3D-14 and 1D-15 drilled in Buor-Khaya Bay in 2014–2015. Based on the results of determining the percentage content of SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂, MgO, Na₂O, K₂O, CaO, MnO, P₂O₅, Cl, Cr, S, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Ba, Y, Zr, organic carbon in sediments, lithochemical modules values were calculated and comparative analysis of the lithological and geochemical composition was performed. Principal differences between near-continental (1D-14 and 3D-14) and relatively distant from land (1D-15) strata were established, which is explained by spatial and temporal variability in sedimentary fluxes and weathering crust activity in the studied area of the Laptev Sea. 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 contribution of igneous and metamorphic rocks to the sedimentary supply in the strata uncovered by drilling was insignificant.

Keywords: Arctic, bottom sediments, subsea permafrost, elemental composition, lithochemical modules, factor analysis

For citation: Ulyantsev A.S., Polyakova N.V. Elemental composition of bottom sediments and permafrost deposits from the Buor-Khaya Bay (Laptev Sea). *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 6: 44–54. (In Russ.).

Введение. Прибрежно-шельфовая зона Арктики представляет собой сложную природную систему, а в районах ее хозяйственного освоения — природно-техногенную систему, функционирование и эволюция которой определяется геологическими, геофизическими и литолого-геохимическими фак-

торами окружающей среды [Дударев и др., 2016; Лаверов и др., 2013; Опыт..., 2001; Павлидис, Никифоров, 2007; Романкевич, Ветров, 2021; Система..., 2009; Grosse et al., 2007; Kanao et al., 2015; Pease et al., 2014; Stein, Macdonald, 2004; Vetrov, Romankevich, 2004]. Актуальность изучения этой системы дикту-

ется современными изменениями климата, способствующими деградации многолетнемерзлых толщ, термоабразии берегов, дегазации и экзарации морского дна, усилению разгрузки речного и грунтового стока, древнего органического углерода, а также необходимостью прогноза опасных природных и антропогенных явлений на шельфе [Лобковский и др., 2015; Никифоров и др., 2016; Batchelor, Dowdeswell, 2015; Günther et al., 2015; Martens et al., 2020; Schuur et al., 2015; Semiletov et al., 2016; Shakhova et al., 2017; Turetsky et al., 2019; Winterfeld et al., 2018]. Планируемая эксплуатация Северного Морского пути, развитие ресурсодобывающей и транспортно-логистической отрасли, промышленное освоение биологических ресурсов акцентируют внимание на комплексных исследованиях морского дна на шельфе арктических морей России как важнейшего транзитно-логистического элемента в системе связей и коммуникаций.

В настоящее время банк данных по литологическому и геохимическому составу донных осадков арктических морей России активно пополняется [Martens et al., 2021]. Расширение знаний по индикаторным характеристикам природных процессов в Арктике, строению осадочной толщи, происхождению осадочного вещества, потокам в системе «суша–шельф–океан» в условиях климатических колебаний и увеличивающейся антропогенной нагрузки, является актуальной задачей. Целью работы был сравнительный анализ литолого-геохимического состава донных отложений и подводных многолетнемерзлых пород губы Буор-Хая моря Лаптевых и установление преобладающих пород выветривания по комплексу литологических и геохимических данных.

Материалы и методы исследований. Материал для исследования (донные отложения и многолетнемерзлые породы) собран в полярных буровых экспедициях весной 2014 г. и в апреле 2015 г. в губе Буор-Хая [Ульянцев и др., 2020а, 2020б]. Скважины были пробурены с припайного льда в 2014 г. в Ивашкиной лагуне полуострова Быковский (1D-14, глубина воды 3,1 м), вблизи северного мыса о. Муостах (3D-14, глубина воды 2,7 м) и в 2015 г. севернее о. Муостах (1D-15, глубина воды 9,8 м) (рис. 1). Литологическое описание кернов бурения выполнено в лабораторию. Пробы консолидированных многолетнемерзлых пород отбирали с помощью аккумуляторной дрели и стальных коронок, пробы талых отложений отбирали стальным шпателем. Далее пробы замораживали в пластиковых зип-пакетах и хранили в морозильнике при температуре -20°C до проведения лабораторной пробоподготовки и анализов. Литологическое описание и гранулометрические характеристики исследованных кернов приведены в [Ульянцев и др., 2020а, 2020б]. Для выполнения анализов элементного состава пробы осадков были высушены до постоянной массы в течение 48 ч при температуре $+60^{\circ}\text{C}$ и измельчены в планетарной



Рис. 1. Карта-схема района исследования и расположения точек бурения в губе Буор-Хая в 2014 (скважины 1D-14 и 3D-14) и 2015 (скважина 1D-15) годах

мельнице Pulverisette 7 (Fritsch, Германия) в течение 10 мин (700 об/мин).

Анализы концентрации SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO , Na_2O , K_2O , CaO , MnO , P_2O_5 , Cl , Cr , S , Ni , Cu , Zn , Rb , Sr , Ba , Y , Zr в 105 пробах выполнены в лаборатории молекулярного и элементного анализа Института химии ДВО РАН на базе ЦКП «Дальневосточный центр структурных исследований». Концентрация элементов была определена методом энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного анализа (ЭДРФА) на приборе Shimadzu EDX-800-HS. Образцы для измерений получали путем прессования из измельченных проб таблеток диаметром 20 мм с помощью ручного пресса (давление — 30 МПа, масса пробы — 2 г, связывающий агент — H_3BO_3 в соотношении 1 г образца к 0,5 г наполнителя. Источник возбуждения — рентгеновская трубка с Rh-анодом. Время экспозиции пробы — 100 с в каждом энергетическом канале. Расчет концентрации элементов проводился с помощью программного комплекса прибора по методу фундаментальных параметров. Результаты определения контролировали по стандартным образцам SRM 2702 Inorganics in Marine Sediment и SRM 2703 Sediment for Solid Sampling (Small Sample) Analytical Techniques. Погрешность измерений не превышала 10% для элементов с содержанием выше 1% и 20% для элементов с содержанием ниже 1% в пробе. Статистическая обработка

Таблица 1

Перечень расчетных параметров на основе элементного состава отложений

Название	Обозначение	Формула
Содержание кварца*	Q	$\text{SiO}_2 - 2,55 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
Гидролизатный модуль	ГМ	$(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})/\text{SiO}_2$
Железный модуль	ЖМ	$(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})/(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$
Титановый модуль	ТМ	$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$
Алюмокремниевый модуль	АМ	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$
Фемический модуль	ФМ	$(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$

Примечание. * — рассчитано в условиях отсутствия биогенного опада по [Левитан, 1998].

результатов (факторный анализ и метод главных компонент) проведена с использованием программного пакета XLSTAT Premium v2016.02.

На основе полученных данных были рассчитаны процентное содержание кварца (Q) и величины литохимических модулей, отражающих состав и генезис осадочных пород [Юдович, Кетрис, 2000], которые явились источником дисперсного осадочного вещества исследованных толщ (табл. 1). Гидролизатный модуль (ГМ) является основой геохимической классификации алюмосиликатных и оксидных осадочных пород и служит для количественной оценки выщелачивания и гидролиза. Величина титанового модуля (ТМ) является характеристикой гипергенных процессов. Железный модуль (ЖМ) отражает соотношение железистых и глиноземистых продуктов гидролиза. Фемический модуль (ФМ) позволяет оценить вклад петрогенных и пирогенных отложений. Алюмокремниевый модуль (АМ) отражает степень глиноземистости осадочных пород. Данные по концентрации органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в исследованных пробах взяты из [Ульянцев и др., 2022].

Характеристика района исследований. Исследуемый район бухты Буор-Хая характеризуется равнинным типом рельефа, а ее современная береговая зона была сформирована под действием термоабразии и термокарста в результате среднеголоценовой трансгрессии моря [Charkin et al., 2011; Lantuit et al., 2011; Romanovskii et al., 2000, 2004; Sanchez-Garcia et al., 2014]. Ивашкина лагуна Быковского полуострова представляет собой затопленную морской водой термокарстовую котловину, соединившуюся с морем на границе голоцена и плейстоцена [Morgenstern et al., 2013; Romanovskii et al., 2000], а о. Муостах, расположенный юго-восточнее полуострова, представляет собой разлагающийся останец той же равнины и состоит преимущественно из верхнеплейстоценовых отложений ледового комплекса [Günther et al., 2015].

В геологическом строении исследуемого района принимают участие отложения протерозоя, палеозоя, мезозоя и кайнозоя [Русанов и др., 1967; Слагода, 2004; Большианов и др., 2013]. Протерозойские отложения представлены алевролитами, песчаниками, доломитами, выходят на поверхность в Хараулахском хребте. К отложениям нижнего палеозоя относятся силурийские известняки и доломиты, выходящие на поверхность вблизи побережья залива Неелова, а также на правом берегу Быковской протоки. Отложения верхнего палеозоя–нижнего мезозоя выходят на поверхность в Хараулахском хребте и в окрестностях п. Тикси. Они объединяются в Верхоянский комплекс, в котором часто чередуются алевролиты, аргиллиты, песчаники и местами встречаются в виде пластов эффузивные горные породы [Куницкий, 1989].

К кайнозойским образованиям относятся отложения палеогена, неогена и четвертичной системы. Палеогеновые отложения представлены надугленосной толщей светло-серых и белых жирных глин; угленосной толщей, в которой чередуются пласты бурого угля с прослойками белой глины, гальки, кварца; подугленосной толщей алевритов. Данные отложения выходят на поверхности в юго-восточной части бухты Тикси и на правом берегу Быковской протоки. Неогеновые отложения выходят на поверхность на о. Сардах и представлены железистыми конгломератами и песчаниками с прослоями рыхлых песков. Отложения четвертичной системы представлены плейстоценовыми галечниками, песками, супесями, суглинками, торфами. Они находятся в многолетнемерзлом состоянии и часто содержат повторно-жильные льды (ледовый комплекс). Широкое распространение отложений ледового комплекса в исследованном районе губы Буор-Хая обуславливает значительный вклад термоабразии в поставку осадочного материала [Charkin et al., 2011; Sanchez-Garcia et al., 2014; Schirrmeister et al., 2017].

Элементные характеристики отложений. Для исследованных буровых профилей выявлено неравномерное по вертикали распределение содержания элементов и оксидов (табл. 2; рис. 2; 3; 4). Для скважин 1D-14 и 3D-14, пробуренных в непосредственной близости к берегу, отмечены близкие по величине средние концентрации элементов (рис. 2; 3), что указывает на генетическое родство отложений из этих скважин. Отложения скважины 1D-15, пробуренной в 10 км северо-восточнее от северного мыса о. Муостах и в 19 км от мыса Муостах п-ва Быковский, отличаются пониженным средним вкладом Fe_2O_3 , TiO_2 и MnO и повышенным Na_2O . Также наблюдается тренд уменьшения содержания Al_2O_3 , Fe_2O_3 и TiO_2 и увеличения содержания SiO_2 с глубиной, который согласуется с изменчивостью вклада кварца и песчаной фракции (рис. 4).

В табл. 3 представлена корреляционная матрица процентного вклада проанализированных элементов. Концентрация SiO_2 обратно коррелирует

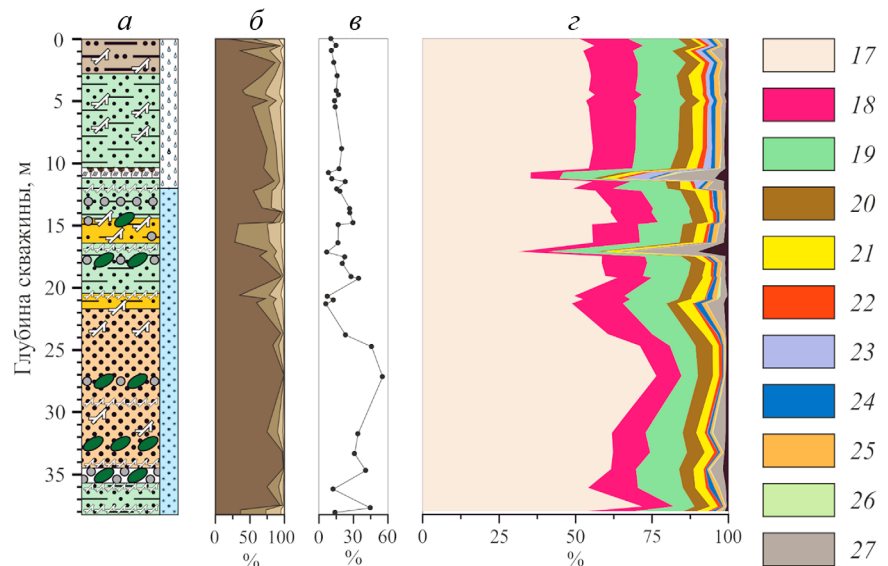


Рис. 2. Литологическое описание (а), гранулометрический состав (б), расчетная концентрация кварца (в) и распределение процентного содержания химических элементов (з) в отложениях скважины 1D-14. 1 — ил алеврито-песчаный; 2 — песок пелитово-алевритовый; 3 — алеврит песчаный; 4 — песок; 5 — песок гравелистый; 6 — древесные остатки; 7 — слой почвенно-растительный; 8 — слой древесных остатков; 9 — гравий; 10 — галька; 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 — SiO₂; 18 — Al₂O₃; 19 — Fe₂O₃; 20 — K₂O; 21 — CaO; 22 — Na₂O; 23 — Cl; 24 — MgO; 25 — TiO₂; 26 — S; 27 — C_{орг}; 28 — P₂O₅ + Cr + Ni + Cu + Zn + Rb + Sr + Ba + Y + Zr

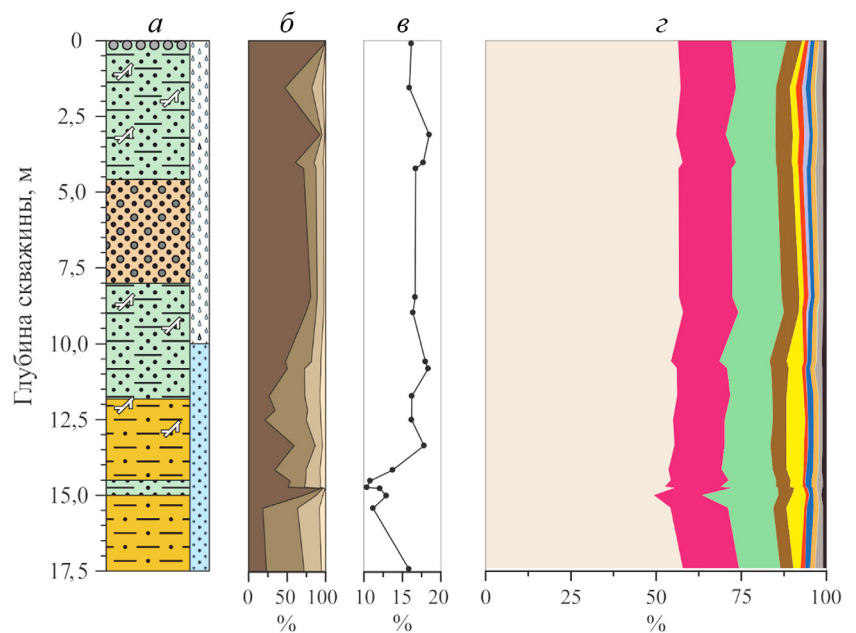


Рис. 3. Литологическое описание (а), гранулометрический состав (б), расчетная концентрация кварца (в) и распределение процентного содержания химических элементов (з) в отложениях скважины 3D-14. Условные обозначения см. рис. 2

с Fe₂O₃ ($r = -0,77$), TiO₂ ($r = -0,65$), MgO ($r = -0,53$), CaO ($r = -0,60$), MnO ($r = -0,57$), P₂O₅ ($r = -0,67$), Ni ($r = -0,58$), Zn ($r = -0,70$), Y ($r = -0,65$), а также C_{орг} ($r = -0,70$). Подобная корреляция отражает доминирующий вклад кварцевых и/или полевошпатово-кварцевых песков в исследованные толщи и концентрирование вышеуказанных элементов и оксидов в алевритах и пелитах, что также подтверждается результатами факторного анализа. Также сказыва-

ется массовое вытеснение кремнием остальных компонентов. Для Na₂O также отмечена отрицательная корреляция с Fe₂O₃, CaO, MnO, Ni, Zn, Y, Rb, Ba, что, скорее всего, является следствием засоления оттаявших толщ отложений и концентрированием морской соли в песчаных отложениях [Ulyantsev et al., 2022].

Из всех проанализированных элементов Al₂O₃ прямо коррелирует только с MgO ($r = 0,75$), что, вероятнее всего, отражает роль слюды как носителя

Таблица 2

Интервалы и средние значения измеренных концентраций элементов (в %) в донных отложениях скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15

Скважина \ Компонент	1D-14 (n=38)	3D-14 (n=19)	1D-15 (n=48)
SiO ₂	<u>35,6–76,5</u> 56,1	<u>49,4–58,0</u> 55,5	<u>48,6–74,5</u> 63,1
Al ₂ O ₃	<u>8,26–16,9</u> 13,8	<u>14,3–17,1</u> 15,7	<u>10,6–18,5</u> 15,3
Fe ₂ O ₃	<u>5,33–19,7</u> 13,4	<u>11,7–22,3</u> 14,1	<u>3,69–14,6</u> 8,29
TiO ₂	<u>0,43–1,88</u> 1,26	<u>1,16–1,57</u> 1,38	<u>0,40–1,59</u> 0,97
MgO	<u>0,36–2,40</u> 1,24	<u>1,03–2,11</u> 1,53	<u>0,49–2,14</u> 1,29
Na ₂ O	<u>0,33–2,62</u> 1,25	<u>0,68–1,90</u> 1,15	<u>1,33–2,92</u> 2,08
CaO	<u>1,15–5,31</u> 2,98	<u>0,74–5,40</u> 3,17	<u>0,82–4,75</u> 1,97
K ₂ O	<u>2,73–5,93</u> 4,61	<u>3,93–5,25</u> 4,53	<u>3,42–5,38</u> 4,18
MnO	<u>0,09–0,56</u> 0,22	<u>0,15–0,43</u> 0,24	<u>0,04–0,35</u> 0,13
P ₂ O ₅	<u>0,02–0,12</u> 0,05	<u>0,04–0,08</u> 0,06	<u>0,01–0,08</u> 0,05
Cl	<u>0,01–8,68</u> 0,96	<u>0,02–1,47</u> 0,36	<u>0,19–1,65</u> 0,65

Скважина \ Компонент	1D-14 (n=38)	3D-14 (n=19)	1D-15 (n=48)
Cr	<u>0,00–0,48</u> 0,12	<u>0,02–0,27</u> 0,11	<u>0,00–0,32</u> 0,04
S	<u>0,08–2,12</u> 0,25	<u>0,06–0,33</u> 0,11	<u>0,03–1,18</u> 0,19
Ni	<u>0,01–0,02</u> 0,01	<u>0,01–0,02</u> 0,01	<u>0,00–0,02</u> 0,01
Cu	<u>0,01–0,04</u> 0,02	<u>0,01–0,02</u> 0,02	<u>0,00–0,03</u> 0,01
Zn	<u>0,01–0,04</u> 0,02	<u>0,02–0,03</u> 0,02	<u>0,01–0,03</u> 0,02
Rb	<u>0,02–0,04</u> 0,03	<u>0,02–0,04</u> 0,03	<u>0,01–0,03</u> 0,02
Sr	<u>0,05–0,17</u> 0,10	<u>0,04–0,15</u> 0,09	<u>0,03–0,14</u> 0,07
Y	<u>0,00–0,01</u> 0,01	<u>0,00–0,01</u> 0,01	<u>0,00–0,01</u> 0,01
Ba	<u>0,08–0,51</u> 0,25	<u>0,13–0,45</u> 0,24	<u>0,04–0,47</u> 0,17
Zr	<u>0,04–0,15</u> 0,06	<u>0,04–0,11</u> 0,07	<u>0,02–0,11</u> 0,04
C _{орг}	<u>0,25–23,1</u> 3,24	<u>0,95–2,33</u> 1,50	<u>0,04–15,2</u> 1,40

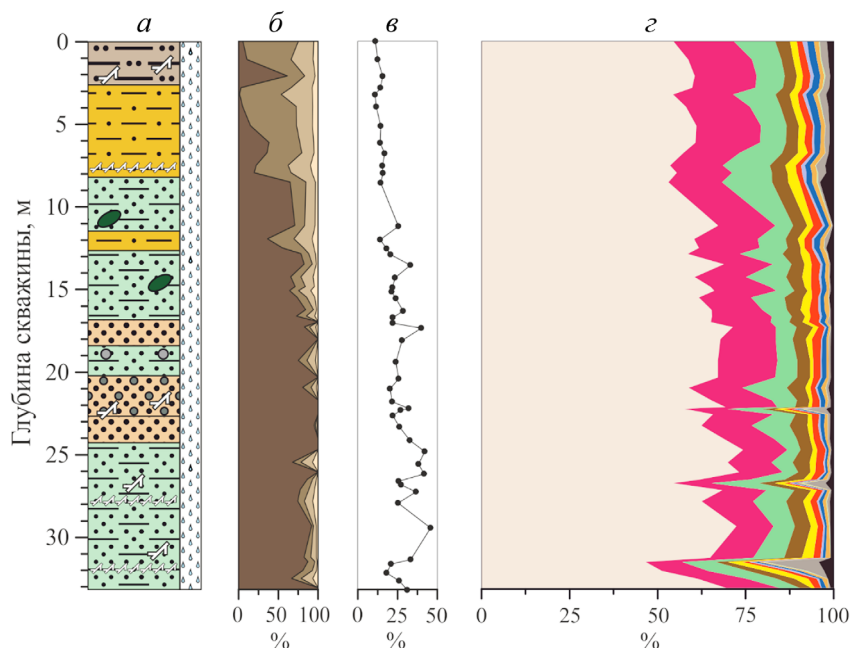


Рис. 4. Литологическое описание (а), гранулометрический состав (б), расчетная концентрация кварца (в) и распределение процентного содержания химических элементов (з) в отложениях скважины 1D-15. Условные обозначения см. рис. 2

Mg, TiO₂ положительно коррелирует с MgO ($r=0,53$), CaO ($r=0,54$), MnO ($r=0,58$), Fe₂O₃ ($r=0,73$), P₂O₅ ($r=0,55$), Ni ($r=0,52$), Zn ($r=0,75$), Rb ($r=0,58$), Y ($r=0,78$), Zr ($r=0,68$), что указывает на концентрирование этих элементов преимущественно в акцессорных минералах, а прямая корреляция Fe₂O₃–TiO₂ указывает на присутствие титана преимущественно в составе ильменита и лейкоксена. С Fe₂O₃ и MnO положительно коррелируют CaO, TiO₂, Ni, Cu, Zn, Rb, Y.

Факторный анализ позволил выделить характерные литолого-геохимические ассоциации (табл. 4). Для первого фактора (F1) с объясняемой дисперсией 43,8% значительная отрицательная нагрузка приходится на Na₂O и SiO₂, тогда как значимые положительные (> 0,5) нагрузки отмечены для большинства компонентов: CaO, TiO₂, Cr, MnO, Fe₂O₃, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Ba, Zr. Такая картина объясняется концентрированием SiO₂ в песчаной

Таблица 3

Корреляционная матрица Пирсона концентраций химических элементов, измеренных в донных отложениях скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15 (n = 105)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Na ₂ O	Cl	MgO	TiO ₂	S	P ₂ O ₅	Cr	MnO	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Y	Ba	Zr	C _{орг}	
SiO ₂	-																						
Al ₂ O ₃	-0,04	-																					
Fe ₂ O ₃	-0,77	-0,01	-																				
K ₂ O	0,17	-0,30	0,25	-																			
CaO	-0,60	-0,20	0,54	0,05	-																		
Na ₂ O	0,37	0,15	-0,71	-0,35	-0,50	-																	
Cl	-0,47	-0,19	0,11	-0,14	0,04	0,34	-																
MgO	-0,53	0,74	0,32	-0,46	0,33	-0,13	0,08	-															
TiO ₂	-0,65	0,33	0,73	0,22	0,54	-0,48	0,12	0,53	-														
S	-0,46	-0,29	0,30	-0,17	0,20	0,03	0,43	0,13	-0,02	-													
P ₂ O ₅	-0,67	0,31	0,49	-0,17	0,13	-0,16	0,44	0,48	0,55	0,00	-												
Cr	-0,14	-0,35	0,36	0,48	0,31	-0,42	0,03	-0,20	0,19	0,03	0,08	-											
MnO	-0,57	-0,04	0,73	0,31	0,62	-0,63	-0,12	0,23	0,58	0,12	0,27	0,33	-										
Ni	-0,58	-0,26	0,76	0,32	0,56	-0,72	-0,01	0,09	0,52	0,24	0,29	0,51	0,67	-									
Cu	-0,49	-0,31	0,57	0,38	0,47	-0,48	0,20	-0,04	0,44	0,09	0,27	0,49	0,50	0,58	-								
Zn	-0,70	0,14	0,81	0,24	0,40	-0,59	0,19	0,36	0,75	0,08	0,56	0,37	0,55	0,62	0,70	-							
Rb	-0,40	-0,22	0,75	0,73	0,39	-0,67	0,04	-0,08	0,58	0,03	0,26	0,60	0,63	0,70	0,62	0,70	-						
Sr	-0,25	-0,52	0,41	0,63	0,64	-0,41	0,00	-0,25	0,32	0,15	-0,07	0,57	0,53	0,54	0,57	0,30	0,67	-					
Y	-0,65	-0,07	0,79	0,37	0,62	-0,60	0,11	0,23	0,78	0,14	0,41	0,47	0,67	0,70	0,58	0,74	0,78	0,59	-				
Ba	-0,07	-0,34	0,36	0,59	0,33	-0,51	-0,16	-0,24	0,21	-0,07	-0,05	0,48	0,44	0,46	0,38	0,26	0,64	0,62	0,44	-			
Zr	-0,43	-0,13	0,52	0,35	0,49	-0,31	0,13	0,05	0,68	0,10	0,30	0,32	0,47	0,49	0,46	0,43	0,53	0,56	0,67	0,31	-		
C _{орг}	-0,70	-0,40	0,26	-0,40	0,36	-0,08	0,54	0,10	0,04	0,50	0,38	-0,01	0,17	0,31	0,30	0,21	-0,02	0,11	0,21	-0,09	0,10	-	

Примечание. Значимые (p < 0,05) корреляции выделены полужирным.

Таблица 4

Значения факторных нагрузок концентраций химических элементов в донных отложениях скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15

Компонент	F1	F2	F3	F4
MgO	0,204	0,846	-0,214	0,281
Na ₂ O	-0,721	0,141	0,202	-0,101
Al ₂ O ₃	-0,209	-0,564	-0,695	0,131
SiO ₂	-0,773	0,584	-0,153	0,009
P ₂ O ₅	0,451	-0,632	-0,208	-0,322
S	0,232	-0,255	0,679	0,025
K ₂ O	0,431	0,745	-0,253	-0,110
CaO	0,704	-0,080	0,255	0,495
TiO ₂	0,754	-0,320	-0,438	0,228
Cr	0,550	0,462	0,037	-0,307
MnO	0,782	-0,018	-0,054	0,233

Компонент	F1	F2	F3	F4
Fe ₂ O ₃	0,881	-0,230	-0,070	-0,064
Ni	0,832	0,021	0,135	-0,079
Cu	0,754	0,087	0,110	-0,275
Zn	0,805	-0,276	-0,254	-0,297
Rb	0,851	0,321	-0,205	-0,188
Sr	0,704	0,519	0,223	0,228
Y	0,903	-0,049	-0,126	0,087
Ba	0,529	0,577	-0,039	0,004
Zr	0,696	0,035	-0,100	0,326
C _{орг}	0,350	-0,481	0,703	-0,151

Примечание. Полужирным выделены значимые факторные нагрузки.

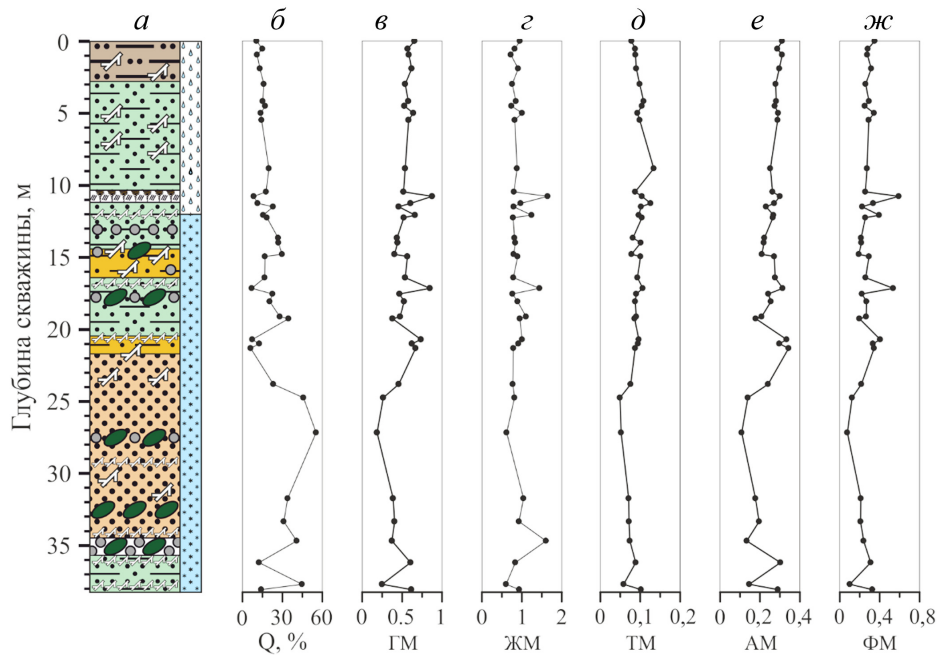


Рис. 5. Литологические данные и вертикальное распределение значений расчетных параметров ядра 1D-14: а — литологическое описание; б — расчетное содержание кварца; в — величина ГМ; г — величина ЖМ; д — величина ТМ; е — величина АК; ж — величина ФМ

фракции, что отражает его обогащение кварцем, подтверждаемое прямой корреляцией SiO_2 –Q ($r=0,81$). Остальные элементы, напротив, сконцентрированы преимущественно в тонкозернистых фракциях, в том числе в связанном с минеральной и/или органической матрицей виде. Связь же Na_2O с SiO_2 в нашем случае объясняется засолением талых толщ в результате диффузии NaCl из морской воды [Ульянцев и др., 2018; Ulyantsev et al., 2022].

Второй фактор (F2) объясняет 17,8% дисперсии. Максимальные положительные нагрузки отмечены для SiO_2 , MgO, K_2O , Sr, Ba, отрицательные — для Al_2O_3 и P_2O_5 . Скорее всего это аналитический сигнал полевых шпатов, пироксенов и амфиболов, сосредоточенных в песчаной фракции, а также апатита и слюды, сконцентрированных в более тонких частицах. Для третьего фактора (F3), объясняющего 10,2% дисперсии, положительные нагрузки отмечены для S и $\text{C}_{\text{орг}}$, отрицательная — для Al_2O_3 . В данном случае сера преимущественно связана с ОВ. Следует отметить, что в случае F2 и F3 для Al_2O_3 отмечены максимальные отрицательные нагрузки, что может быть связано в первом случае с противопоставлением Al_2O_3 песчаной фракции, во втором — ОВ. Вклад четвертого фактора (F4) в объясняемую дисперсию составляет 5,0%, однако значимых нагрузок для него не обнаружено.

Литохимические модули. Как и в случае отдельных элементов и оксидов, в исследованных буровых профилях наблюдаются значительные колебания величины расчетных модулей по вертикали (рис. 5; 6; 7, табл. 5). Отложения скважины 1D-15 отличаются пониженными по сравнению с 1D-14 и 3D-14 средними величинами ГМ, ЖМ, ТМ и ФМ; средние

значения АМ близки. Наименьшая вариабельность значений геохимических модулей отмечена для скважины 3D-14, отложения из которой также отличаются слабой изменчивостью литологических и органо-химических характеристик [Ульянцев и др., 2022; Ulyantsev et al., 2022]. Для всех рассчитанных модулей отмечена взаимная положительная корреляция разной силы.

На основе литохимической классификации, предложенной Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис [Юдович, Кетрис, 2000], исследованные отложения отличаются пониженной магнизиальностью ($\text{MgO} < 3\%$ во всех пробах) (рис. 8, а). Нормо- и супержеле-

Таблица 5

Интервалы и средние значения расчетного содержания кварца и литохимических модулей в донных отложениях скважин 1D-14, 3D-14 и 1D-15

Скважина \ Параметр	1D-14 (n=38)	3D-14 (n=19)	1D-15 (n=48)
Q, %	<u>6,09–55,4</u> 21,0	<u>10,4–18,5</u> 15,3	<u>11,0–45,7</u> 24,0
ГМ	<u>0,18–0,88</u> 0,53	<u>0,50–0,78</u> 0,57	<u>0,23–0,59</u> 0,40
ЖМ	<u>0,61–1,65</u> 0,92	<u>0,68–1,46</u> 0,84	<u>0,28–1,15</u> 0,53
ТМ	<u>0,05–0,13</u> 0,09	<u>0,07–0,10</u> 0,09	<u>0,03–0,11</u> 0,06
АМ	<u>0,11–0,34</u> 0,25	<u>0,26–0,31</u> 0,28	<u>0,15–0,31</u> 0,25
ФМ	<u>0,08–0,59</u> 0,28	<u>0,23–0,49</u> 0,29	<u>0,06–0,30</u> 0,16

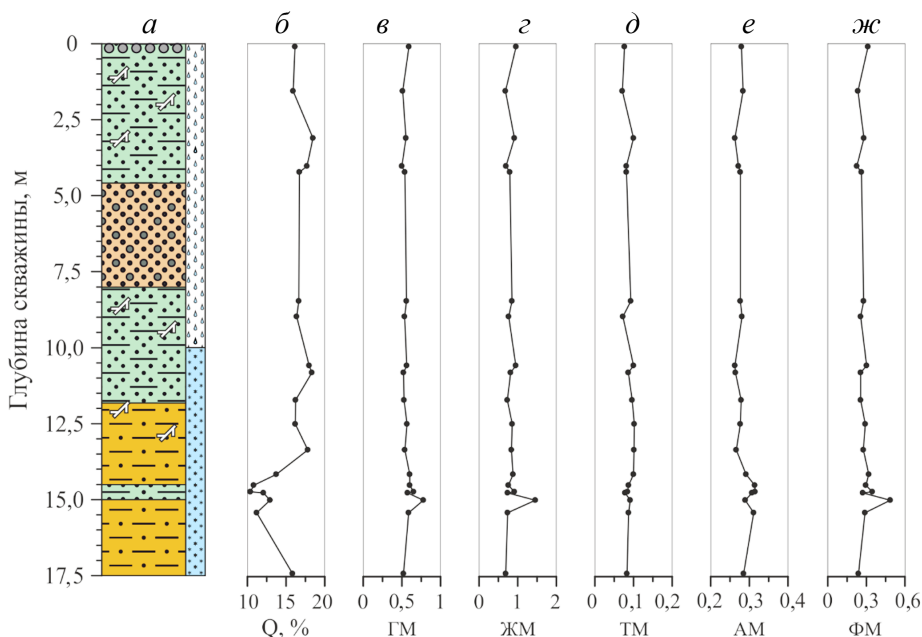


Рис. 6. Литологические данные и вертикальное распределение значений расчетных параметров ядра 3D-14: а — литологическое описание; б — расчетное содержание кварца; в — величина ГМ; г — величина ЖМ; д — величина ТМ; е — величина АК; ж — величина ФМ

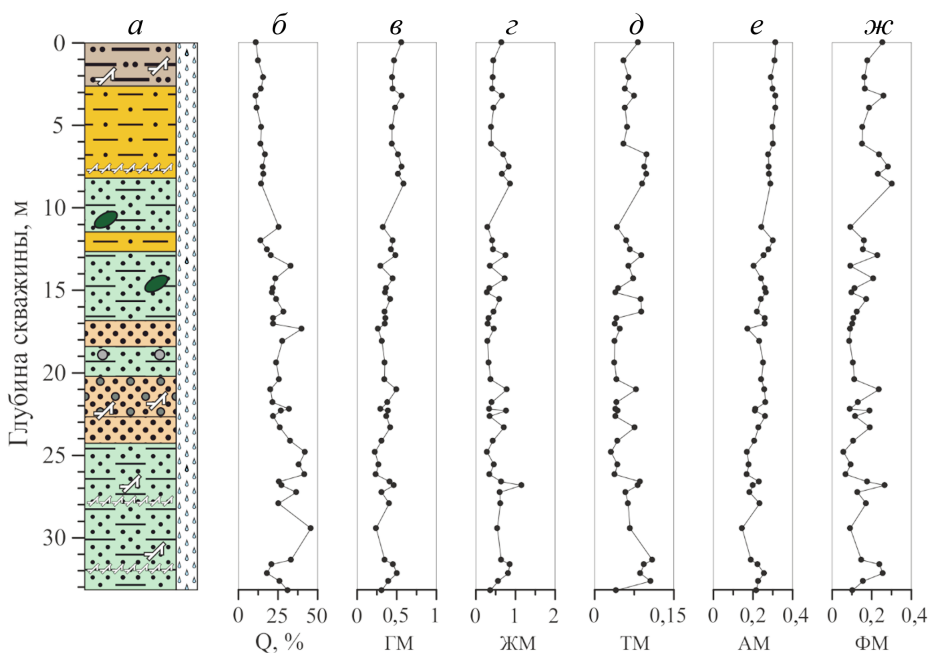


Рис. 7. Литологические данные и вертикальное распределение значений расчетных параметров ядра 1D-15: а — литологическое описание; б — расчетное содержание кварца; в — величина ГМ; г — величина ЖМ; д — величина ТМ; е — величина АК; ж — величина ФМ

зистыми в значительной степени представлены отложения и многолетнемерзлые породы скважин 1D-14 и 3D-14, пробуренных близ берега, тогда как отложения скважины 1D-15 отличаются пониженной железистостью. Следует полагать, что столь широкий диапазон значений ГМ и ЖМ является следствием полимиктовости отложений. Тем не менее, значительная доля исследованных отложений, в подавляющем большинстве норможелезистых, указывает на обогащение вскрытых бурением толщ обломками осадочных пород.

По величине ТМ исследуемые отложения отличаются незначительными колебаниями и относятся к стандарту нормотитанистых, в большинстве соответствующих среднему составу осадочных пород [Юдович и др., 2018]. В единичных случаях, они переходят к супертитанистым (рис. 8, б), свойственным, например, метабазитам, отвечающим основным метаморфизованным породам. Меньшие (<0,06) значения ТМ, как правило, свойственны алевролитам, аргиллитам и глинистым сланцам. В целом, повышенная титанистость осадочного вещества

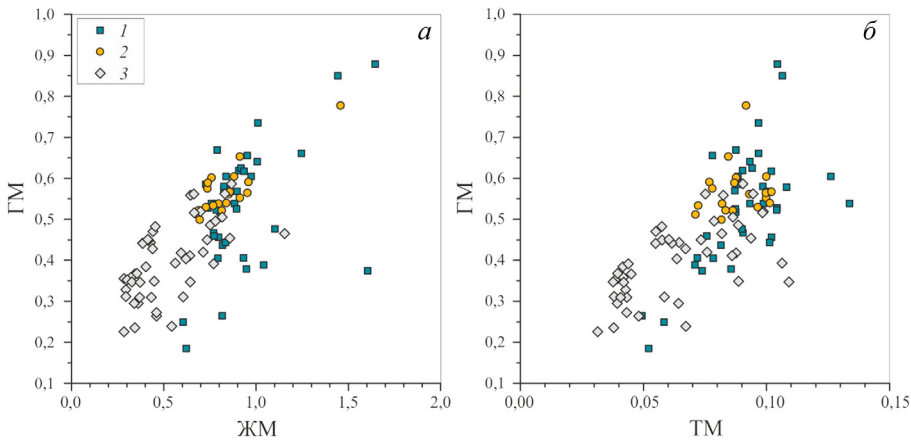


Рис. 8. Модульные диаграммы ГМ-ЖМ (а) и ГМ-ТМ (б). 1 — пробы из скважины 1D-14; 2 — пробы из скважины 3D-14; 3 — пробы из скважины 1D-15

отложений скважин 1D-14 и 3D-14 ($TM_{cp} = 0,09$) по сравнению с 1D-15 ($TM_{cp} = 0,06$) отражает поставку в приконтинентальные толщи больших количеств обломков аргиллитов и алевролитов. Наблюдаемая положительная корреляция величины ЖМ с ТМ ($r = 0,68$) и ФМ ($r = 0,85$), отражающая «эндогенную» связь в триаде Fe-Ti-Mg, свойственна петрогенным отложениям. В свою очередь, положительная корреляция ТМ с ГМ ($r = 0,70$) и ФМ ($r = 0,73$) также отражает связь Ti с Fe и Mg в магматическом процессе.

По величине ФМ исследованные отложения характеризуются нормальной фемичностью, ряд образцов из скважин 1D-14 и 3D-14 являются гипофемичными (рис. 9, а). Повышенные относительно океанских кремнистых отложений значения ФМ и положительная корреляция в парах ГМ-ФМ ($r = 0,96$) и ТМ-ФМ ($r = 0,73$) могут быть следствием присутствия в составе изученных отложений обломков вулканогенно-осадочных пород, что также подтверждается положительной корреляцией Ti с Mg ($r = 0,53$) и Fe ($r = 0,73$). Однако их вклад, по-видимому, носит подчиненный характер. Средняя величина АМ по трем исследованным профилям примерно одинакова и соответствует нормоглиноземистым осадкам (рис. 9, б), что соответствует среднему составу осадочных горных пород континентов [Ронов и др., 1990]. Величина АМ в исследованных осадках обратно коррелирует с расчетной концентрацией кварца ($r = -0,98$)

и содержанием SiO_2 ($r = -0,69$), что, вероятно, вызвано динамической дифференциацией слагающего вскрытые бурением толщи осадочного вещества. На колебания АМ могут оказывать влияние и другие факторы. Например, пониженные значения АМ могут отражать практически полное отсутствие в исследованных отложениях гидрослюд, а также являются аналитическим сигналом полевых шпатов [Юдович и др., 1984].

Закключение. Основываясь на геологическом строении и физико-географических характеристиках исследуемого района бухты Буор-Хая, полученные данные по элементному составу донных отложений и многолетнемерзлых пород позволили заключить, что основой петрофонда вскрытых бурением толщ являются осадочные породы Хараулахского хребта Верхоянской горной системы, а также поступающие с речным стоком Лены продукты термоабразии слагающих ее толщ. В этих толщах отмечено присутствие гравийно-галечных разностей, больших количеств древесных и травянистых остатков, торфа и почв, а их литолого-геохимическая дифференциация связана с пространственно-временной изменчивостью источников и потоков осадочного вещества, среди которых на разных этапах осадконакопления доминировали аллювиальные, термоабразионные и эоловые.

Толщи профилей 1D-14 и 1D-15 сложены преимущественно песками, и определяющим фактором

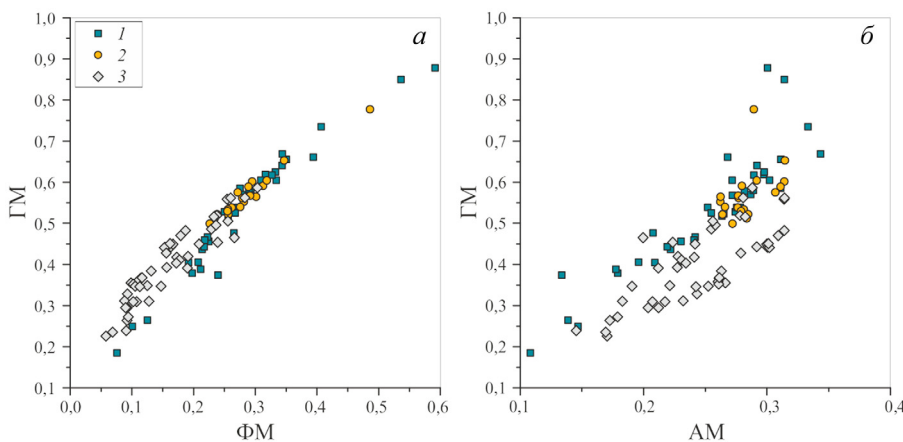


Рис. 9. Модульные диаграммы ГМ-ФМ (а) и ГМ-АМ (б). 1 — пробы керна 1D-14; 2 — пробы керна 3D-14; 3 — пробы керна 1D-15

осадконакопления для них была динамика речного стока. Различия же в этих профилях обусловлены географическим расположением 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 меньшем вкладе песка в осадках и доминировании здесь криогенных сингенетических отложений, основным движущим механизмом накопления которых был эоловый перенос. Тем не менее, отложения скважин 1D-14 и 3D-14, пробуренных в близости к суше, роднит сходная изменчивость элементного состава и значений литохимических модулей, что указывает на единство источников осадочного вещества, из которых основу составили алевриты и аргиллиты.

В относительной отдаленности от береговой линии в толщах отложений скважины 1D-15 отмечен повышенный вклад SiO_2 и кварца, источником которого являются уже преимущественно

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. *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. *Куницкий В.В.* Криолитология низовья Лены. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1989. 164 с.
4. *Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В.* и др. Геодинамическая модель развития арктического бассейна и примыкающих территорий для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России // Геотектоника. 2013. № 1. С. 3–35.
5. *Левитан М.А.* О соотношении основных компонентов вещества в современных и древних океанических осадочных потоках // Докл. РАН, 1998. Т. 359, № 2. С. 220–222.
6. *Лобковский Л.И., Никифоров С.Л., Дмитриевский Н.Н.* и др. О процессах газовыделения и деградации подводных многолетнемерзлых пород на шельфе моря Лаптевых // Океанология. 2015. Т. 55, № 2. С. 312–320.
7. *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.
8. Опыт системных океанологических исследований в Арктике / Под ред. А.П. Лисицына, М.Е. Виноградова, Е.А. Романкевича. М.: Научный Мир, 2001. 644 с.
9. *Павлидис Ю.А., Никифоров С.Л.* Обстановки морфолитогенеза в прибрежной зоне Мирового океана. М.: Наука, 2007. 455 с.
10. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Углерод в Мировом океане. М.: ГЕОС, 2021. 352 с.
11. *Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А.* Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.
12. *Русанов Б.С., Бороденкова З.Ф., Гончаров В.Ф.* и др. Геоморфология Восточной Якутии. Якутск: Якуткнигоиздат, 1967. 376 с.
13. Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Х. Кассенс и др. М.: Изд-во МГУ, 2009. 608 с.
14. *Слагода Е.А.* Криолитогенные отложения Приморской равнины моря Лаптевых: литология и микроморфология. Тюмень: ИПЦ «Экспресс», 2004. 120 с.
15. *Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Дударев О.В.* и др. Концентрация, изотопный и элементный состав органического вещества в субаквальных талых и многолетнемерзлых отложениях губы Буор-Хая // Океанология. 2022. Т. 62, № 4. С. 564–577.
16. *Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Дударев О.В.* и др. Литолого-геохимическая характеристика морфолитогенеза в губе Буор-Хая // Океанология. 2020а. Т. 60, № 3. С. 407–417.
17. *Ульянцев А.С., Братская С.Ю., Привар Ю.О.* Гранулометрические характеристики донных отложений губы Буор-Хая // Океанология. 2020б. Т. 60, № 3. С. 452–465.
18. *Ульянцев А.С., Полякова Н.В., Братская С.Ю.* и др. Таяние подводных многолетнемерзлых отложений как фактор изменения их элементного состава // Докл. РАН. 2018. Т. 483, № 3. С. 326–330.
19. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литогеохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
20. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Мерц А.В.* и др. Петрохимическая диагностика вулканогенных продуктов в черносланцевых отложениях Пай-Хоя // Геохимия. 1984. № 6. С. 868–882.
21. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В.* Геохимия титана. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2018. 432 с.
22. *Batchelor C.L., Dowdeswell J.A.* Ice-sheet grounding-zone wedges (GZWs) on high-latitude continental margins // Marine Geology. 2015. Vol. 363. P. 65–92.

песчаники. По мере осадконакопления здесь наблюдается плавное затухание поставки песчаного материала и постепенный переход к современным субаквальным обстановкам морфолитогенеза. По мере приближения к границе вода-дно хорошо сортированные пески сменяются плохо сортированными алеврито-пелитовыми разностями, и различия в литологическом составе отложений в конечном счете были подтверждены результатами элементного анализа осадков.

Благодарности. Авторы выражают благодарность д.г.н., члену-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. Авторы признательны д.г.м.н. М.А. Левитану за плодотворное обсуждение статьи и ценные рекомендации по интерпретации данных.

Финансирование. Химические анализы, расчеты, интерпретация выполнены при финансовой поддержке РФФ (проект № 19-77-10044). Обобщение результатов проведено в рамках Государственного задания ИО РАН (тема № FMWE-2024-0019).

23. 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. Vol. 8. P. 2581–2594.
24. Grosse G., Schirrmeyer L., Siegert C., et al. Geological and geomorphological evolution of a sedimentary periglacial landscape in Northeast Siberia during the Late Quaternary // *Geomorphology*. 2007. Vol. 86. P. 25–51.
25. 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. Vol. 9. P. 151–178.
26. Kanao M., Suvorov V.D., Toda S., et al. Seismicity, structure and tectonics in the Arctic region // *Geoscience Frontiers*. 2015. Vol. 6 (5). P. 665–677.
27. 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. Vol. 30. P. 7341.
28. Martens J., Romankevich E., Semiletov I., et al. CASCADE — The Circum-Arctic Sediment Carbon Database // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. Vol. 13. P. 2561–2572.
29. Martens J., Wild B., Muschitiello F., et al. Remobilization of dormant carbon from Siberian-Arctic permafrost during three past warming events // *Science Advances*. 2020. Vol. 6, № 42. eabb6546.
30. Morgenstern A., Ulrich M., Günther F., et al. Evolution of thermokarst in East Siberian ice-rich permafrost: A case study // *Geomorphology*. 2013. Vol. 201. P. 363–379.
31. Pease V., Drachev S., Stephenson R., et al. Arctic lithosphere — a review // *Tectonophysics*. 2014. Vol. 628. P. 1–25.
32. 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. Vol. 23. P. 1359–1369.
33. 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. Vol. 11. P. 137–152.
34. 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. Vol. 25. P. 172–183.
35. Schirrmeyer L., Schwamborn G., Overduin P.P., et al. Yedoma Ice Complex of the Buor Khaya Peninsula (southern Laptev Sea) // *Biogeosciences*. 2017. Vol. 14. P. 1261–1283.
36. Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520. P. 171–179.
37. 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. Vol. 9. P. 361–365.
38. 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. Vol. 8. P. 15872.
39. Stein R., Macdonald R.W. The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer, 2004. 363 p.
40. Turetsky M.R., Abbott B.W., Jones M.C., et al. Permafrost collapse is accelerating carbon release // *Nature*. 2019. Vol. 569. P. 32–34.
41. Ulyantsev A., Polyakova N., Trukhin I., et al. Peculiarities of Pore Water Ionic Composition in the Bottom Sediments and Subsea Permafrost: A Case Study in the Buor-Khaya Bay // *Geosciences*. 2022. Vol. 12. P. 49.
42. Vetrov A.A., Romankevich E.A. Carbon cycle in the Russian Arctic Seas. Berlin: Springer — Verlag, 2004. 331 p.
43. Winterfeld M., Mollenhauer G., Dummann W., et al. Deglacial mobilization of pre-aged terrestrial carbon from degrading permafrost // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. P. 3666.

Статья поступила в редакцию 28.06.2023,
одобрена после рецензирования 02.10.2023,
принята к публикации 22.01.2024