

УДК 551.35:549(268)

МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕСЧАНОЙ ФРАКЦИИ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОСАДКАХ ЮЖНОЙ ОКРАИНЫ ЧУКОТСКОГО ПЛАТО, СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН

© 2019 г. О. Н. Колесник^{1,*}, А. Н. Колесник¹, Е. Г. Вологина², А. А. Марьяш¹

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток, Россия

² Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

*e-mail: kolesnik_o@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 21.08.2017 г.

После доработки 04.06.2018 г.

Принята к публикации 02.07.2018 г.

Представлены данные минералогического анализа тонкого и мелкого песка в составе осадков, накопленных в южной части Чукотского плато за четвертичное время. Рассмотрены ассоциации и распределение по разрезу породообразующих и акцессорных минералов, их связь с другими характеристиками. Выявленные минералогические особенности, обусловленные климатическими изменениями — периодами потепления и похолодания, могут быть использованы в решении ряда генетических вопросов, стратификации, палеоре-конструкциях.

Ключевые слова: Северный Ледовитый океан, Чукотское плато, четвертичный период, донные осадки, песчаная фракция, породообразующие минералы, акцессорные минералы, цветовая характеристика, литостратиграфия, палеоре-конструкции

DOI: 10.31857/S0030-1574594617-640

ВВЕДЕНИЕ

Анализ минерального состава донных отложений составляет неотъемлемую часть исследований морского полярного литогенеза. Основная масса осадочного материала в высоких широтах представлена кластическими минералами. Их распределение в бассейне седиментации происходит в процессе механической дифференциации и контролируется размером, формой, удельным весом и транспортабельностью (плавучестью) обломков минералов и горных пород при важной роли течений (их направления и скорости), ледовой обстановки, рельефа морского дна. В составе песчаной (у некоторых исследователей крупноалевритовой) фракции морских донных отложений полярных районов доминируют аллотигенные минералы, наблюдается особенное разнообразие минеральных видов и максимум концентрации тяжелых минералов. Аутигенные минералы составляют незначительную часть песчаной фракции, к тому же вопрос об их формировании в процессе накопления осадков нередко является дискуссионным. Учитывая терригенный характер осадков и ал-

лотигенную природу основной части слагающих их минералов, можно с достаточной степенью надежности использовать минеральный состав песчаной фракции для характеристики условий осадконакопления [8]. Первоочередное внимание должно уделяться ассоциациям минералов, степени устойчивости минеральных видов к выветриванию и переносу [16].

Цель настоящего исследования — охарактеризовать минеральный состав песчаной фракции в верхней части осадочной толщи Чукотского плато, определить наиболее вероятные время и условия, в которых проходила седиментация. Выбор района и участка работ обусловлен специфической морфологией дна, предполагающей наличие флюидного элемента, и вместе с тем недостаточной изученностью объекта.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЯ

Чукотское плато, или поднятие, расположено в Американо-Тихоокеанском (суб)бассейне Северного Ледовитого океана (рис. 1, слева) и представляет собой подводную террасу — шельф, погруженный на глубину около 500–800 м. Это часть бордер-

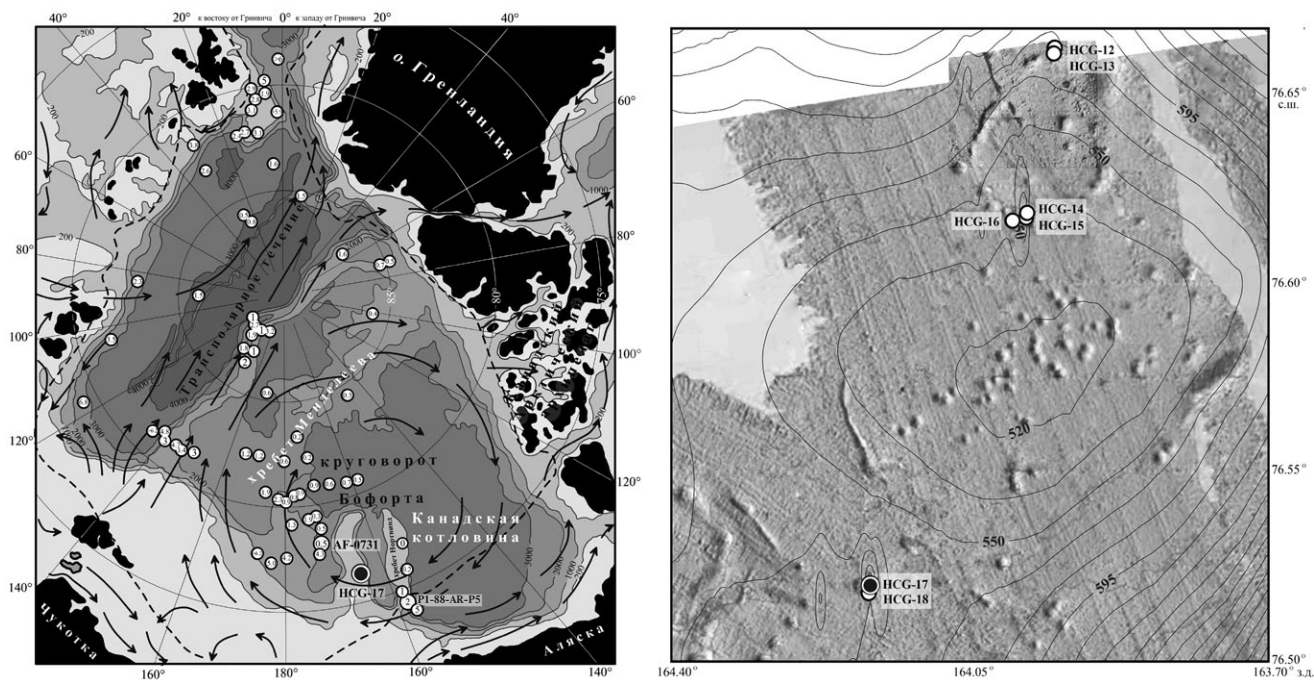


Рис. 1. Слева: расположение колонки осадков HCG-17 и сопоставительных колонок AF-0731 [7] и P1-88-AR-P5 [44, 45] на Чукотском бордерленде Северного Ледовитого океана с указанием основных поверхностных течений (стрелки), средней летней границы распространения морского льда в современную эпоху (пунктир) и локальных средних скоростей осадконакопления для последних пяти морских изотопных стадий (цифры в кружках, см/тыс. лет) [18, 30, включая ссылки внутри]. Справа: рельеф дна в районе исследования с указанием всех станций пробоотбора [1, 2, включая ссылки внутри].

ленда Чукотского моря, сформировавшегося в кайнозойское время в результате рифтогенной деструкции континентальной земной коры. В состав бордерленда входят также хребты Нортвинд и Менделеева с разделяющими их депрессиями. Поднятия получают достаточно обильное терригенное питание; скорость седиментации здесь в среднем в два раза выше, чем во внутренних районах Северного Ледовитого океана, и может достигать 3–4 см/тыс. лет [18]. Чукотское плато покрыто маломощным осадочным чехлом. На склонах, которые имеют значительную крутизну, вероятны выходы коренных пород. В южной части плато получили развитие донные воронки глубиной 40–50 м, похожие на покмарки [1, 2, 23, 38]. В настоящее время они неактивны. Последний этап активной дефлюидизации имел место 35–20 тыс. лет назад [2]. Поле воронок приурочено к вершине куполообразного поднятия, на севере и юго-западе осложненного более мелкими формами (рис. 1, справа). Иногда в краевых частях этих форм прослеживаются углубления, напоминающие рвы проседания. На северном участке воронки расположены в виде кольца. В месте наиболее плотного сосредоточения они

образуют единый желоб — предположительно разлом, по которому произошло вертикальное смещение с амплитудой около 40 м. На юго-западе (район исследования) выявлены крупные впадины диаметром несколько километров с выположенным дном.

О составе донных отложений и о породах кристаллического фундамента Чукотского плато известно немного [1, 2, 10, 13, 23]. Имеющиеся данные указывают на сходство с соседними поднятиями, которые изучены гораздо подробнее [7, 9, 10, 14, 15, 20, 27, 34, 42–46, 48 и др.]. Часть осадочной толщи, опробованная грунтовыми трубками, сложена преимущественно глинами с прослоями диатомовых отложений и песков. В составе крупномерного материала отчетливо доминируют угловатые и полуокатанные обломки осадочных пород (песчаники, алевролиты, доломиты, известняки) при небольшом вкладе изверженных и метаморфических пород. Большинство отечественных и зарубежных исследователей считает, что донно-каменный материал является продуктом ледового и айсбергового разноса физически выветрелых пород обрамляющей суши (дрифтовый материал).

На склонах подводных гор, где происходит разрушение коренных пород (в фундаменте предполагаются типично платформенные отложения палеозой-мезозойского возраста), не исключено значительное количество эдафогенных обломков [10, 27]. Определяющая роль в перемещении морских льдов и айсбергов отводится двум крупным системам поверхностных течений — круговороту Бофорта и трансполярному дрейфу (рис. 1, слева). Особенное значение в переносе тепла и солей и определении климата придается промежуточной водной массе с существенным вкладом атлантических вод. Адвекция этих вод в Северный Ледовитый океан была наиболее активной во время межледниковий (МИС 5.5, МИС 1), некоторых интерстадиалов (МИС 3, МИС 5.1, МИС 5.3) и в меньшей степени проявила себя в ряде стадиалов и оледенений (МИС 4, МИС 2) (МИС — морская изотопная стадия) [17, 18]. В вопросе транспортировки и аккумуляции осадочного материала нельзя не учитывать характера циркуляции глубинной водной массы, в особенности придонной, и гравитационного переноса осадков [17]. На протяжении последних нескольких морских изотопных стадий схема циркуляции водной толщи была относительно устойчивой [18, 40].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы. Для изучения выбрана колонка осадков HCG-17 — самая длинная и самая глубоководная из поднятых нами на южном фланге Чукотского плато в пределах поля донных воронок (юго-западный участок) [1] (рис. 1). Пробоотбор осуществлялся гидростатической грунтовой трубкой с борта НИС “Профессор Хромов” в рамках российско-американской экспедиции RUSALCA-2009. Глубина моря на станции составила 635 м, мощность вскрытых отложений — 262 см. На борту судна колонка была порезана через сантиметр, пробы герметично упакованы и в охлажденном состоянии доставлены в кернохранилище. Колонка имеет следующий вид (описание выполнено Е.А. Логвиной, ВНИИ Океангеология):

- 0–11 см — уплотненный пелитовый ил, коричневатый; 3–5 см — линза мягкого вязкого пелита серого цвета;
- 11–19 см — вязкие липкие пелит-алевритовые отложения, оливковые;
- 19–31 см — уплотненный вязкий алевропелит светло-серого цвета с включениями обломочно-

го материала размером до 1 см; 28–29 см — линза брекчиевидной темно-серой глины с включениями обломочного материала и суглинков;

- 31–33 см — уплотненный вязкий алевропелит, светло-бежевый до белого;
- 33–36 см — уплотненный вязкий алевропелит, светло-серый;
- 36–150 см — липкий вязкий пелит, чередование тонких (до 1 мм) слоев темно-коричневого, бежевого и серого цвета; 54–56 см — линза плотного темно-коричневого алевропелита; 92–94 см, 101–103 см — линзы плотного коричневого алевропелита; 104–114 см — вертикально ориентированная линза темно-коричневого цвета, 150 см — линза темно-коричневого пелита;
- 150–152 см — наклонно залегающий прослой уплотненного массивного пелита с незначительной песчаной примесью, цвет бежевый до белого;
- 152–164 см — уплотненный липкий пелит, оливковый; 155 см, 159–161 см — линзы уплотненного липкого пелита темно-коричневого цвета;
- 164–210 см — липкий вязкий пелит, серый; 200 см, 203 см — прослой уплотненного бежевого алевропелита с песчаной примесью;
- 210–214 см — уплотненный массивный светло-коричневый алевропелит;
- 214–222 см — уплотненный массивный бежево-серый алевропелит; 222 см — тонкий прослой светло-бежевого пелита;
- 222–230 см — уплотненный липкий алевропелит с переслаиванием, цвет меняется от бежевого до темно-коричневого;
- 230–262 см — уплотненный вязкий бежевый алевропелит.

Отобранный на Чукотском плато материал (колонки HCG-12, -13, -14, -15, -16, -17, -18; рис. 1, справа) изучен фрагментарно и неравномерно. Прослежено распределение по разрезу цветовых (оптических) и петромагнитных характеристик, органических остатков, выявлены некоторые черты вещественного состава, проанализирован изотопный состав углерода и кислорода карбонатных пород и органического вещества осадков; построена модель флюидодинамики и развития донных воронок [1, 2, 12, 23, 25]. Почти все сведения касаются северного участка и в первую очередь колонки HCG-12. Юго-западный участок фактически не рассматривался.

Методы. Минералогический анализ выполнен для верхних 250 см колонки HCG-17 (рис. 2),

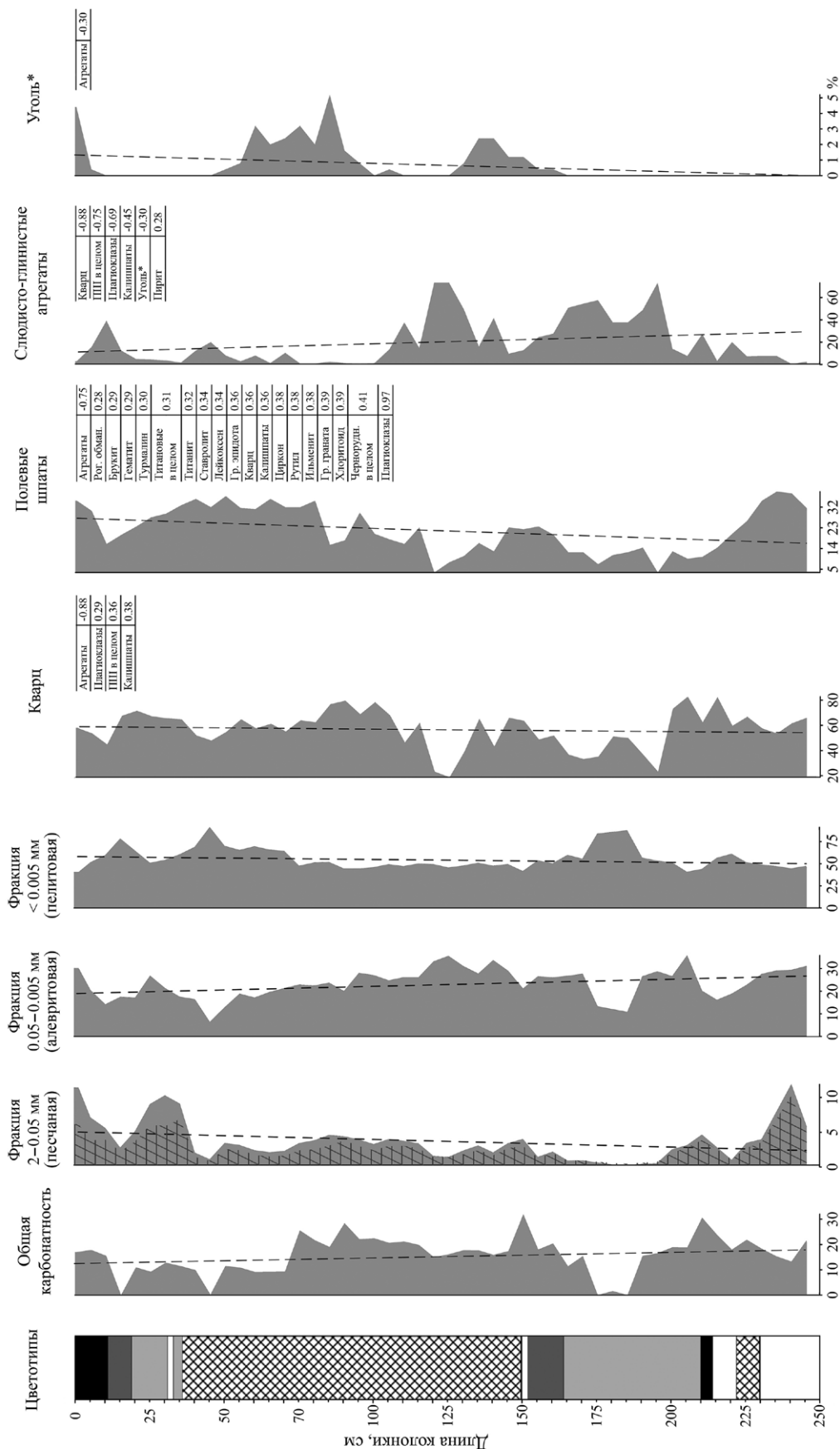


Рис. 2. Общие характеристики, особенности распределения и статистические связи минералов легкой фракции в тонко- и мелкопесчаной части осадков колонки НСГ-17, Чукотское плато. Цветотипы: черным, темно-серым, серым, белым цветом и перекрестной штриховкой в колонке отмечены осадки различного цвета — коричневые, оливковые, серые, бежевые и пестрые соответственно. Фракция 2–0.05 мм: перекрестной штриховкой показано содержание тонкого и мелкого песка с размером зерен 0.25–0.05 мм (классификация по [28]). Пунктиром на всех графиках выделены линейные тренды. В таблицах указаны значимые коэффициенты корреляции (± 0.2790) некоторых компонентов легкой фракции с другими минеральными составляющими тонко- и мелкозернистого песка. ПШ в целом — полевые шпаты, общее содержание плагиоклаза и калишпатов; рог. обман. — роговая обманка; титановые в целом — титановые минералы, общее содержание титанига, рутила, лейкоксена, анатаза и брукита; чернорутил в целом — чернорутильные минералы, общее содержание магнетита, ильменита, гетита и тематита; уголь* — уголь, углефицированные и минерализованные растительные остатки.

остальная (нижняя) часть утеряна. Изучалась гранулометрическая фракция 0.25–0.05 мм. Согласно классификации Рухина [28], это тонко- и мелкозернистый песок, по другим классификациям — мелкий песок и крупный алеврит. Частицы нужной размерности выделялись в результате промывания и рассеивания материала на ситах. Процедура предварялась кипячением проб в растворе соляной кислоты (5% HCl) с определением общей карбонатности. В ходе минералогического анализа минералы разделялись в бромформе с удельным весом 2.9 г/см³ на легкую и тяжелую фракции (подфракции), а затем просматривались в препаратах под микроскопом МИН-8. При этом использовались иммерсионные жидкости с показателями преломления 1.63 (тяжелая фракция), 1.54 и 1.53 (легкая фракция). В легкой фракции каждой пробы определялось 250 минеральных зерен. Для тяжелой фракции методикой предусмотрено определение 500 зерен. Однако при малом выходе тяжелой фракции анализировались все содержащиеся в пробе зерна. Таким способом обработано 50 проб легкой фракции и 49 проб тяжелой фракции (проба из интервала 53–58 см была повреждена, в ней подсчитано только содержание магнетита).

Минералогические данные сопоставлены с цветотипами осадков и некоторыми другими параметрами; статистически охарактеризованы направление и сила связей между отдельными минералами и их группами. Проведена корреляция с датированными и в целом подробно изученными колонками региона, выполнено стратиграфическое расчленение осадков. Песчанистые и обогащенные обломочными карбонатами прослой рассматривались в качестве основных стратиграфических реперов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате иммерсионного анализа тонко- и мелкозернистого песка в составе колонки НСГ-17 определен комплекс породообразующих и акцессорных минералов (легкая и тяжелая фракции соответственно), слагающих терригенную, а следовательно, подавляющую массу осадков верхней части осадочного чехла Чукотского плато.

Тонкий и мелкий песок присутствует во всех пробах в виде сравнительно небольшой, но стабильной примеси. Среднее содержание составляет 2.7%, близость к медианному значению

(2.4%) указывает на нормальный характер распределения (рис. 2). Существенно песчанистые интервалы располагаются в самой верхней части колонки (интервал 0–3 см, 6.3% песка), а также на поддонных глубинах 23–38 см (6.0% песка и выше) и 233–248 см (5.2% и выше, включая абсолютный пик 10.7%). Устойчиво низкое содержание частиц песчаной размерности зафиксировано в интервале 153–203 см. Внутри интервала содержание не превышает 1.9%, здесь же отмечен абсолютный минимум 0.2%. Количество в пробах песчаного и более крупномерного материала демонстрирует тенденцию уменьшения вниз по разрезу в прямой зависимости от содержания алеврита и обратной — от содержания пелита (средние значения составляют 23.4 и 56.0% соответственно) (рис. 2).

Общая карбонатность. Карбонаты являются типичным компонентом осадков. Частота встречаемости в пробах составляет 90%. Содержание иногда достигает 30.0% при среднем 15.6% (табл. 1, рис. 2). Незначительное расхождение с медианой (16.3%) свидетельствует об относительно симметричном распределении. Верхние 13 см осадков демонстрируют значения, близкие к среднему. Ниже по разрезу (интервал 13–73 см) распространены слабо- и бескарбонатные осадки. Далее выделяется мощный горизонт с повышенной, особенно ближе к краевым частям, карбонатностью. На этот отрезок приходится абсолютный пик содержания — 32.0%. В интервале 173–188 см карбонаты не обнаружены. Последние 60 см осадков характеризуются значениями, близкими к среднему, при общем росте карбонатности к центральной части интервала вплоть до 30.6% — второго по значимости пика в колонке. Линия тренда указывает на общий рост количества карбонатов вниз по разрезу. Об остаточном содержании карбонатов в тяжелой фракции — см. подраздел “Тяжелая фракция...”.

Легкая фракция (главным образом породообразующие минералы) составляет основу песчаной части осадков. В колонке преобладают кварц, слюдисто-глинистые агрегаты, полевые шпаты (табл. 1, рис. 2). Отмечается небольшое количество угля, углефицированных и минерализованных растительных остатков. Почти во всех пробах, но, как правило, на уровне знаков фигурируют обломки горных пород и слюды. В единичных пробах обнаружены редкие знаки графита, хлорита, спикул губок. Зерна имеют свежий либо слабоизмененный облик,

Таблица 1. Колонка НСГ-17, Чукотское плато: общая карбонатность и содержание минералов легкой фракции в тонко- и мелкочесанной части осадков, %

Интервал, см	Карбонаты	Кварц	Платио- клазы	Агрегаты	Калишпаты	Уголь*	Обломки пород	Выход фракции	Интервал, см	Карбонаты	Кварц	Платио- клазы	Агрегаты	Калишпаты	Уголь*	Обломки пород	Выход фракции
0-3	16.4	58.0	31.2	2.8	3.6	4.4	зн.	99.4	133-138	17.7	65.2	12.4	16.0	4.0	2.4	0.0	99.5
3-8	17.9	53.6	28.0	15.6	2.4	0.4	зн.	99.4	138-143	15.9	43.2	10.4	41.6	2.4	2.4	0.0	99.4
8-13	15.6	44.8	14.8	39.2	1.2	зн.	зн.	99.1	143-148	17.4	66.0	19.6	9.6	3.6	1.2	зн.	99.7
13-18	0.0	67.6	16.8	12.4	3.2	ед.зн.	зн.	98.5	148-153	32.0	63.6	18.0	12.8	4.4	1.2	0.0	99.5
18-23	11.0	71.6	19.6	4.8	4.0	0.0	зн.	99.4	153-158	18.0	48.8	17.2	24.4	6.4	0.4	0.0	99.4
23-28	9.3	67.2	24.8	4.4	2.8	ед.зн.	0.8	99.4	158-163	20.4	52.0	15.2	27.6	4.8	0.4	ед.зн.	99.4
28-33	12.6	65.6	26.4	3.6	2.8	зн.	1.6	99.3	163-168	11.4	36.8	10.8	50.8	1.6	зн.	ед.зн.	99.1
33-38	11.5	64.8	29.2	1.6	3.6	зн.	0.8	99.3	168-173	15.4	33.2	11.6	54.4	0.8	ед.зн.	ед.зн.	99.6
38-43	9.7	52.0	32.8	12.4	2.8	ед.зн.	ед.зн.	98.1	173-178	0.0	35.2	4.8	57.6	2.4	ед.зн.	ед.зн.	99.6
43-48	0.0	48.0	29.2	20.0	2.8	ед.зн.	зн.	98.3	178-183	0.0	51.2	8.0	37.6	3.2	ед.зн.	зн.	99.5
48-53	11.5	54.8	34.4	8.0	2.4	0.4	0.0	99.4	183-188	0.0	50.0	10.0	37.6	2.4	ед.зн.	ед.зн.	98.9
53-58	10.9	64.8	28.0	2.8	3.6	0.8	ед.зн.	99.6	188-193	15.5	36.8	8.4	48.8	6.0	ед.зн.	ед.зн.	99.7
58-63	9.1	57.6	28.8	8.0	2.4	3.2	0.0	99.5	193-198	16.6	23.2	2.8	73.2	0.8	зн.	ед.зн.	99.7
63-68	9.3	61.2	31.6	1.2	4.0	2.0	ед.зн.	98.8	198-203	18.9	73.2	9.6	14.0	3.2	зн.	ед.зн.	99.8
68-73	9.3	55.2	28.0	10.4	4.0	2.4	ед.зн.	98.9	203-208	18.8	82.8	8.0	7.6	1.6	зн.	0.0	99.8
73-78	25.6	64.0	28.0	0.8	4.0	3.2	ед.зн.	99.5	208-213	30.6	62.4	6.0	27.2	4.4	зн.	ед.зн.	99.1
78-83	21.7	62.4	29.6	0.8	5.2	2.0	ед.зн.	99.6	213-218	23.9	82.4	7.2	3.2	7.2	ед.зн.	ед.зн.	99.2
83-88	18.6	76.8	9.6	2.4	6.0	5.2	ед.зн.	99.7	218-223	18.0	59.6	15.6	20.0	4.8	ед.зн.	ед.зн.	99.2
88-93	28.4	79.6	12.8	1.2	4.8	1.6	ед.зн.	98.9	223-228	21.9	66.8	18.8	7.2	7.2	ед.зн.	ед.зн.	99.5
93-98	22.1	68.8	18.8	0.8	10.8	0.8	зн.	99.6	228-233	18.4	57.6	25.2	7.6	9.6	ед.зн.	зн.	99.5
98-103	22.5	78.4	14.0	1.2	6.4	зн.	ед.зн.	99.6	233-238	15.3	53.6	30.4	7.6	8.4	0.0	зн.	94.5
103-108	20.6	68.0	12.8	13.6	5.2	0.4	зн.	99.2	238-243	13.3	61.6	31.2	0.4	6.8	ед.зн.	зн.	95.3
108-113	21.2	46.4	10.0	37.6	6.0	зн.	0.0	99.6	243-248	15.0	66.0	21.6	2.4	10.0	зн.	зн.	99.6
113-118	19.8	62.0	16.0	14.8	7.2	зн.	зн.	99.5	\bar{x}	15.6	56.9	17.8	20.1	4.3	1.6	0.1	99.2
118-123	15.0	23.2	2.4	73.2	1.2	ед.зн.	ед.зн.	99.7	Me	16.3	60.4	16.4	12.4	4.0	1.2	0.0	99.4
123-128	16.2	18.8	4.4	73.2	3.6	ед.зн.	ед.зн.	99.7	x_{max}	32.0	82.8	34.4	73.2	10.8	5.2	1.6	99.8
128-133	17.8	39.2	6.4	49.2	4.4	0.8	0.0	99.3	x_{min}	0.0	18.8	2.4	0.4	0.8	0.0	0.0	94.5

Примечание. Уголь* — уголь, углефицированные и минерализованные растительные остатки. Зн., ед.зн. — знаки, единичные знаки. \bar{x} — среднее содержание, Me — медиана, x_{max} — максимум, x_{min} — минимум.

Кроме перечисленных минералов, в пробах содержится незначительное количество биотита, мусковита, графита, хлорита, спикул губок (в основном ед.зн., зн.).

обычно встречаются угловато-окатанные, полу-окатанные разности. Распределение по колонке в целом стремится к симметричному (среднее содержание близко к медианному). Причина некоторых отклонений — наличие содержаний, значительно превосходящих медиану.

Кварц. Бесцветные, белые, желтоватые угловато-окатанные и окатанные зерна неправильной, реже призматической формы. В некоторых зернах видны газово-жидкие и мелкие черные включения. Минерал распространен повсеместно в количестве около 56.9% при размахе значений 18.8–82.8%. Картина распределения довольно пестрая со слабовыраженной тенденцией уменьшения содержания вниз по разрезу. На поддонных глубинах 13–38, 53–108 см и ниже 198 см количество минерала стабильно выше среднего с переходом в локальные пики. В интервале 198–218 см оно достигает своего верхнего предела.

Полевые шпаты. Бесцветные прозрачные, белые, желтоватые, серые и красноватые угловато-окатанные и окатанные зерна призматической и таблитчато-призматической формы, редко неправильной. Обычно хорошо заметна спайность. У плагиоклазов иногда наблюдаются полисинтетические двойники, у микроклинов — двойниковая решетка. Попадают пелитизированные (очень мутные) зерна. Полевые шпаты представлены в разрезе широко и повсеместно. Содержание плагиоклазов в среднем составляет 17.8%. Калишпатов гораздо меньше — 4.3%. Минералы обоих рядов характеризуются существенным разбросом содержаний: максимальные значения превышают минимальные более чем в 10 раз. В вертикальном разрезе идет постоянное чередование различных по протяженности интервалов с повышенным и пониженным относительно среднего содержанием полевых шпатов. Основные пики располагаются в самой верхней части колонки и на поддонных глубинах 48–53 и 233–238 см. Полевые шпаты почти в точности повторяют картину распределения плагиоклазов. Вариации по разрезу калишпатов более специфичны. Судя по линии тренда, с глубиной доля плагиоклазов убывает, а калишпатов, напротив, несколько возрастает.

Агрегаты. Представлены светло-серыми, беловатыми оформленными частицами слюдисто-глинистого состава. Распространены по всему разрезу, среднее содержание составляет 20.1%. При этом в нижней части колонки (исключая основание, где выявлен абсолютный

минимум 0.4%) агрегаты встречаются по крайней мере в два раза чаще, чем в верхней. Особенно обогащены осадки второго метра разреза. Максимальное количество слюдисто-глинистых агрегатов (73.2%) отмечено в интервалах 118–128 и 193–198 см. В верхней части колонки (первый метр) выделяется локальный пик на глубине 8–13 см; ниже зафиксировано еще несколько более мелких всплесков содержания.

Уголь, углефицированные и минерализованные растительные остатки. Уголь представлен черными угловато-окатанными, иногда остроугольными зернами. Они неправильной формы и хрупкие. Преобразованные растительные остатки выглядят как буровато-черные, коричневые и светло-коричневые вытянутые обломки с волокнистым строением. Присутствуют в колонке практически постоянно (96% просмотренного материала) в виде небольшой примеси, в среднем составляющей 1.6%. При этом среди проб больше половины таких, в которых уголь и преобразованные растительные остатки фиксируются на уровне знаков и единичных знаков. На фоне крайне низкого содержания резко выделяется несколько максимумов — в первых сантиметрах колонки (4.4%) и на глубинах 83–88 см (5.2% — абсолютный максимум, предваряемый двумя более мелкими пиками) и 133–143 см (2.4%). В общем характере распределения заметна тенденция уменьшения содержания вглубь разреза.

Обломки пород. Темно-серые, зеленовато-серые угловато-окатанные, редко окатанные зерна неправильной формы. Содержание очень низкое, порядка 0.1%. В подавляющем большинстве проб обломки присутствуют в знаковом количестве. Почти пятая часть материала вообще лишена обломков. Большой скачок содержания до 1.6% (абсолютный максимум) обнаружен на поддонной глубине 28–33 см. В целом сверху вниз по разрезу наблюдается уменьшение количества обломков.

Биотит. Коричневые, светло- и зеленовато-коричневые угловато-окатанные и окатанные тонкие пластинки. Колонка почти лишена биотита. Как правило, это редкие знаки. Выявлен единственный интервал 153–158 см, осадки которого содержат значимое (2.8%) количество минерала. О содержании биотита в тяжелой фракции — см. следующий подраздел.

Мусковит. Бесцветные угловато-окатанные и окатанные тонкие мелкие пластинки. Встречен в виде знаков и единичных знаков в 70% про-

смотренных проб. Оставшаяся часть материала мусковита не содержит. Общая картина распределения по колонке невыразительна.

Графит. Черные угловато-окатанные и окатанные тонкие пластинчатые зерна, иногда изогнутые. Минерал представлен в колонке фрагментарно. Содержится в четвертой части изученных проб в знаковом количестве.

Хлорит. Зеленые окатанные мелкие тонкие пластинки. Диагностирован на поддонных глубинах 13–18, 28–33 и 103–108 см исключительно в знаковом количестве.

Спикюлы губок. Бесцветные прозрачные тонкоцилиндрические обломки с осевым каналом. В колонке обнаружены в знаковом количестве на глубине 3–23 см.

Тяжелая фракция (аксессуарные минералы). Выход фракции низкий, в среднем 0.8%. Диапазон значений — от 0.2 до 5.5% (интервалы 198–208 и 233–238 см соответственно). По сравнению с легкой фракцией спектр минералов заметно шире. Всего в колонке выявлено 26 аксессуариев, в пробах диагностируется от десяти до двадцати трех минеральных видов (табл. 2). Наибольшее разнообразие отмечено в интервалах 23–33 см и 103–108 см, наименьшее, включая абсолютный минимум, — на поддонной глубине 168–203 см. Среди аксессуарных минералов доминируют чернорудные и титановые, или титанистые (основную массу составляют магнетит, титанит, ильменит), а также гранаты, эпидот, пироксены, пирит (табл. 2, рис. 3). Амфиболы и циркон встречаются практически повсеместно, но в подчиненном количестве. В некоторых пробах отмечаются корунд, силлиманит, турмалин, ставролит, апатит, хлоритоид, оливин, биотит. Редко и, как правило, в ничтожном количестве фиксируются карбонаты. Минеральные зерна в основном неизменные либо слабоизмененные, средней степени окатанности. Распределение по колонке большинства аксессуариев приближается к симметричному. Некоторые отклонения, наблюдаемые, в частности, у пирита и роговой обманки, объясняются присутствием значений, существенно превышающих медианное.

Группа граната. Бесцветные, розоватые, буровато-красноватые, единичные медово-желтые (интервал 228–233 см) и зеленоватые (интервал 233–238 см) угловато-окатанные, реже окатанные и угловатые зерна неправильной формы, отдельные ромбоэдрические кристаллы. Иногда имеют черепитчатую поверхность, некото-

рые с газовой-жидкими включениями и мелкими включениями черного вещества. Гранаты относятся к наиболее распространенным в колонке минералам. Они содержатся во всех изученных пробах в количестве от 2.6 до 32.0% (интервалы 8–13 и 228–233 см соответственно) при среднем значении 15.0%. В целом вниз по колонке наблюдается увеличение доли гранатов.

Группа эпидота. Бесцветные, серые, чуть зеленоватые, фисташково-зеленые угловато-окатанные и окатанные изометричные зерна неправильной и призматической формы. Иногда содержат включения. В колонке минералы группы эпидота распространены широко и повсеместно. Распределение носит характер, близкий к пилообразному. Сверху вниз прослеживается общий рост содержания при среднем значении 14.7%. Особенно значительные всплески отмечены на поддонных глубинах 33–38 см (абсолютный максимум 28%), 88–93 и 208–213 см, спады — в интервалах 8–13 см (абсолютный минимум 3.2%), 23–28, 68–73 и 183–193 см.

Магнетит. Черные и стально-серые угловато-окатанные, реже окатанные и угловатые зерна неправильной формы, единичные октаэдрические кристаллы, в отдельных пробах в виде земляных масс. Редкие зерна лимонитизированы, иногда с неглубокими бороздами на поверхности. В колонке магнетит является главным черным рудным минералом и принадлежит к числу наиболее распространенных аксессуариев. Среднее содержание — 12.1%. Заметное обогащение наблюдается в верхней трети разреза в интервале 8–78 см: среднее содержание возрастает до 15.7%, фиксируется абсолютный максимум 42.0%. Ниже есть еще один участок повышенного содержания (148–193 см, 14.9%). Меньше всего минерала, вплоть до абсолютного минимума 2.0%, содержится в основании колонки. Таким образом, для изученных осадков характерно общее обеднение магнетитом вниз по разрезу.

Пирит. Латунно-желтые, иногда с радужной побежалостью угловато-окатанные, редко окатанные зерна неправильной формы, единичные кубические кристаллы (интервал 98–103 см) со штриховкой на гранях, шаровидные конкреции, часто уплощенные изогнутые пластинки. Встречаются псевдоморфозы гетита по пириту (красновато-коричневые с радужной побежалостью неправильные зерна). Поверхность некоторых зерен шероховатая, ямчатая. Обычно в тяжелой фракции проб содержится около 12.4% пирита. В вертикальном разрезе отчетливо

Таблица 2. Колонка НСГ-17, Чукотское плато: содержание минералов тяжелой фракции в тонко- и мелколесчаной части осадков, %

Интервал, см	Группа граната	Группа эпидота	Магнетит	Пирит	Титанит	Диопсид- авит	Ильменит	Гетит	Роговая обманка	Лейкоксен	Гиперстен	Гематит	Циркон	Корунд	Карбонаты	Выход фракции
0-3	14.4	18.8	8.6	2.4	7.2	6.2	13.2	10.6	6.2	4.4	1.8	3.8	0.6	0.0	0.6	0.6
3-8	11.2	15.4	15.6	5.0	5.2	5.4	5.0	21.0	4.0	3.0	2.2	3.0	0.4	0.4	0.0	0.6
8-13	2.6	3.2	3.2	73.8	2.0	1.4	3.0	6.0	0.4	0.6	0.6	2.0	0.2	0.4	0.0	0.9
13-18	9.4	9.4	40.2	2.8	5.4	6.2	3.8	11.0	1.0	1.2	2.0	3.6	1.0	1.6	0.0	1.5
18-23	9.8	16.0	9.8	19.6	5.2	7.2	6.8	11.2	1.6	4.0	3.2	3.4	0.4	0.0	0.0	0.6
23-28	19.8	4.0	13.8	6.6	4.8	2.8	18.2	11.6	2.6	4.0	0.8	3.4	3.6	0.4	0.0	0.6
28-33	16.2	18.4	8.4	1.0	4.4	4.2	7.0	16.6	6.4	3.6	1.0	5.6	0.8	0.0	0.2	0.7
33-38	14.0	28.0	10.8	0.6	5.8	4.6	4.0	7.2	9.6	2.0	3.0	3.4	1.8	0.0	0.0	0.7
38-43	6.6	9.4	3.0	4.0	5.0	4.2	3.6	55.6	2.4	0.6	0.6	2.2	0.6	0.4	0.2	1.9
43-48	12.8	8.8	42.0	4.0	4.6	3.8	4.4	7.8	0.2	1.0	1.2	0.6	1.0	6.0	0.2	1.7
48-53	14.8	19.2	13.6	4.2	8.2	11.8	4.6	7.2	4.8	2.2	1.4	1.4	1.4	1.4	0.0	0.6
53-58			12.8													0.4
58-63	14.6	17.2	9.0	9.4	11.6	15.0	6.0	2.6	2.8	2.6	3.0	0.6	2.0	1.4	0.0	0.5
63-68	15.6	8.8	16.8	17.4	6.6	9.0	5.6	5.4	1.2	2.8	4.6	1.2	1.8	1.8	0.0	1.2
68-73	11.2	4.4	30.8	26.4	3.2	6.0	5.0	5.2	1.0	1.0	0.8	1.4	0.4	1.8	0.0	1.1
73-78	19.2	21.8	5.8	8.2	9.4	14.6	5.8	0.4	3.0	2.0	1.8	1.6	3.2	0.0	0.0	0.5
78-83	20.2	13.4	10.4	5.2	11.0	12.4	5.2	1.0	2.4	2.4	4.0	2.8	4.6	0.4	0.0	0.4
83-88	26.4	11.0	10.2	10.2	8.6	11.4	6.8	1.4	0.8	2.4	2.6	1.8	3.6	0.0	0.4	0.3
88-93	13.0	27.4	9.0	3.0	12.0	15.6	5.2	1.0	3.2	1.6	3.2	1.8	2.2	зн.	0.0	1.1
93-98	31.6	13.0	4.0	8.2	10.2	7.4	11.6	0.2	1.8	3.6	2.0	1.2	2.4	0.2	0.0	0.4
98-103	27.6	12.4	10.8	9.8	7.8	7.2	7.4	1.2	2.4	0.6	2.0	1.2	3.0	3.6	0.0	0.4
103-108	19.8	21.2	3.2	4.8	8.8	12.6	5.4	0.4	8.6	2.4	1.6	2.0	2.0	0.2	0.0	0.8
108-113	17.2	17.8	4.0	8.2	8.8	14.2	8.2	1.0	4.8	4.6	4.2	0.8	2.2	0.0	0.0	0.4
113-118	22.6	16.0	5.4	7.0	9.4	8.2	12.0	0.2	2.8	3.4	4.2	1.8	2.0	0.0	0.0	0.5
118-123	10.4	14.2	16.8	7.2	13.0	11.0	2.6	1.4	2.6	5.2	2.6	6.4	2.0	1.4	0.0	0.3
123-128	14.2	12.0	12.6	28.6	8.2	3.8	7.6	1.2	0.0	5.6	0.6	0.4	1.2	1.4	0.0	0.3
128-133	16.6	16.0	12.4	17.2	6.8	10.6	4.8	1.0	4.6	1.4	2.4	1.2	0.8	0.4	0.0	0.7
133-138	15.0	24.2	6.6	14.8	8.8	14.8	2.8	1.8	2.6	1.6	2.0	1.0	0.4	0.0	0.0	0.5

Таблица 2. Продолжение

Интервал, см	Группа граната	Группа эпидота	Магнетит	Пирит	Титанит	Диопсид- авгит	Ильменит	Гетит	Роговая обманка	Лейкоксен	Липерстен	Гематит	Циркон	Корунд	Карбонаты	Выход фракции
138–143	13.4	15.2	10.6	16.8	7.6	11.8	3.6	1.6	1.0	3.6	5.8	1.8	1.2	0.8	0.0	0.6
143–148	16.6	14.0	9.0	11.0	9.8	7.6	7.8	3.8	3.2	4.6	1.8	2.6	1.6	2.2	0.0	0.3
148–153	14.6	21.8	9.0	5.0	9.6	14.2	3.8	2.2	5.4	1.8	5.0	1.8	1.6	0.2	0.0	0.5
153–158	7.0	12.6	23.2	9.4	7.8	9.8	8.4	8.2	2.2	3.4	0.6	2.4	1.6	0.0	0.0	0.6
158–163	20.6	14.6	13.2	6.4	7.6	7.8	7.6	4.8	5.2	3.4	1.6	2.2	0.2	1.2	0.0	0.6
163–168	6.8	12.6	13.4	9.4	14.4	11.8	1.6	10.0	4.2	4.2	3.4	0.8	0.0	1.6	0.0	0.9
168–173	4.6	20.0	12.6	10.0	16.4	12.6	5.4	7.2	1.8	1.8	3.6	0.0	1.0	1.0	0.0	0.4
173–178	10.2	7.6	25.4	22.8	8.8	1.2	3.8	3.8	2.6	2.6	1.2	0.0	1.2	8.8	0.0	0.4
178–183	11.0	6.4	15.8	34.8	1.6	3.2	1.6	8.0	4.8	1.6	0.0	1.6	0.0	8.0	1.6	0.5
183–188	7.8	4.6	15.4	32.4	9.2	3.0	3.0	10.8	1.6	0.0	3.0	3.0	0.0	3.0	0.0	1.1
188–193	4.2	4.2	6.2	56.4	6.2	2.0	12.6	0.0	2.0	2.0	0.0	0.0	0.0	4.2	0.0	0.3
193–198	12.6	10.0	12.6	33.8	7.6	5.0	6.2	3.8	1.2	0.0	1.2	1.2	0.0	1.2	0.0	0.3
198–203	13.0	17.4	8.6	10.8	4.4	4.4	0.0	6.6	8.6	8.6	4.4	2.2	6.6	0.0	0.0	0.2
203–208	8.0	10.2	17.4	13.8	8.0	12.4	6.2	1.8	3.2	2.4	5.0	1.2	5.8	0.6	0.0	0.2
208–213	8.0	26.8	13.2	0.4	12.0	16.0	5.6	1.4	4.6	1.6	4.2	1.6	1.2	0.2	0.0	0.9
213–218	14.0	22.0	10.4	1.8	12.0	16.2	5.2	2.0	3.4	3.0	1.8	2.2	2.0	0.2	0.0	0.8
218–223	7.2	20.2	12.8	7.4	14.2	19.0	3.4	2.2	3.4	2.2	2.2	1.6	1.2	0.0	0.0	0.8
223–228	24.6	18.4	7.0	2.6	14.4	9.6	5.0	1.2	3.6	3.2	1.4	1.2	3.0	0.0	0.0	0.5
228–233	32.0	13.2	3.4	1.8	12.4	8.0	14.2	0.4	2.2	3.6	1.2	0.8	2.2	0.2	0.0	0.5
233–238	31.8	15.4	2.6	0.6	15.2	6.6	15.6	0.8	0.6	3.2	0.6	0.6	3.2	0.2	0.0	5.5
238–243	26.8	19.0	2.0	0.2	15.8	5.0	14.4	1.4	2.0	5.8	0.4	0.8	2.8	0.0	0.0	4.7
243–248	25.6	16.8	3.8	1.6	12.4	3.8	13.8	2.2	1.4	3.4	0.6	1.4	2.0	0.0	6.6	0.4
\bar{x}	15.0	14.7	12.1	12.4	8.7	8.7	6.5	5.7	3.1	2.8	2.2	1.9	1.7	1.2	0.1	0.8
Me	14.2	15.2	10.5	8.2	8.6	7.8	5.4	2.2	2.6	2.6	2.0	1.6	1.6	0.4	0.0	0.6
x_{max}	32.0	28.0	42.0	73.8	16.4	19.0	18.2	55.6	9.6	8.6	5.8	6.4	6.6	8.8	6.6	5.5
x_{min}	2.6	3.2	2.0	0.2	1.6	1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2

Примечание. Зн. — знаки. Пустая строка — проба повреждена, подсчитано только содержание магнетита. \bar{x} — среднее содержание, Me — медиана, x_{max} — максимум, x_{min} — минимум. Кроме перечисленных минералов, в пробах содержится незначительное количество рутила, турмалина, силлиманита, ставролита, хлоритола, тремолита, брукита, апатита, оливина, биотита, анатаза (в среднем вклад каждого не превышает 0.7%).

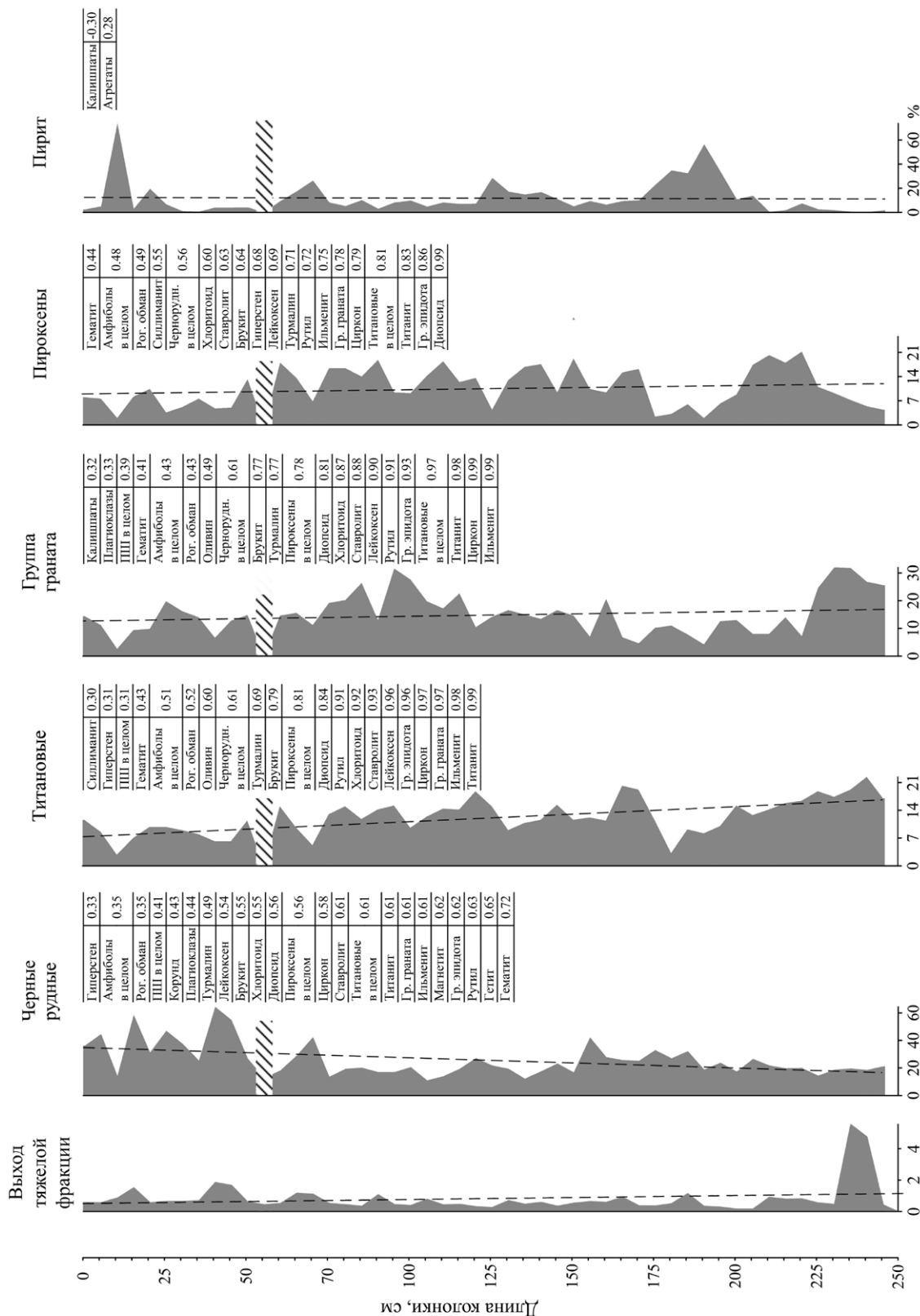


Рис. 3. Особенности распределения и статистические связи минералов тяжелой фракции в тонко- и мелкопесчаной части осадков колонки НСГ-17, Чукотское плато. Пунктиром на всех графиках выделены линейные тренды. В таблицах указаны значимые коэффициенты корреляции некоторых минералов тяжелой фракции и их групп ($r = \pm 0.2820$, кроме магнетита, для которого соответствующее значение составляет ± 0.2790) с другими минеральными компонентами тонко- и мелкозернистого песка. Амфиболы в целом — общее содержание роговой обманки (рог. обман.) и тремолита; ПШ в целом — полевые шпаты, общее содержание платиоказа и калишпатов; пироксены в целом — общее содержание диопсид-авгита и гиперстена; титановые в целом — титановые минералы, общее содержание титанита, рутила, лейкоксена, анатаза и брукита; чернорудн. в целом — чернорудные минералы, общее содержание магнетита, ильменита, гетита и гематита.

прослеживается два крупных пика в верхней (интервал 8–13 см, абсолютный максимум 73.8%) и нижней частях колонки и два более мелких, расположенных между ними. Самым незначительным количеством пирита отличаются осадки в основании разреза. В них зафиксирован абсолютный минимум — 0.2%. В линии тренда находит отражение редкое по своей равномерности распределение с едва уловимым понижением содержания вниз по профилю.

Титанит. Желтоватые, желто-коричневые, в некоторых случаях бесцветные угловато-окатанные и окатанные зерна неправильной, реже призматической и конвертообразной формы, иногда лейкоксенизированные. Главный титановый минерал. Частота встречаемости в пробах — 100%. Содержание в тяжелой фракции осадков варьирует от 1.6 до 16.4% при среднем 8.7%. Нижняя часть колонки отличается от верхней более высоким (10.0 против 7.4%) и вместе с тем неустойчивым содержанием титанита. Глубже 163 см в осадках локализуется два участка повышенного содержания, включая абсолютный максимум. Участки разделены интервалом, где количество минерала резко падает до абсолютного минимума. В верхней части колонки особенно низкие, близкие к минимальному, значения отмечены в пробах, отобранных из интервалов 8–13 и 68–73 см. В целом сверху вниз по разрезу наблюдается существенный рост содержания титанита.

Диопсид-авгит. Бесцветные, чуть зеленоватые, зеленые и коричневатозеленые угловато-окатанные и окатанные зерна призматической и короткопризматической или неправильной формы, иногда имеют зубчатые окончания. Среднее содержание по колонке — 8.7%. Верхние полметра разреза обеднены диопсид-авгитом, содержание не превышает среднего. Ниже, до глубины 173 см, наблюдается пилообразная картина распределения: среднее содержание выше среднего по колонке и составляет 10.9% при колебаниях от 3.8 до 15.6%. Далее следует резкий спад до абсолютного минимума 1.2% (интервал 173–203 см). Ближе к основанию колонки он сменяется ростом, зафиксирован абсолютный пик 19.0%. В основании содержание опять уменьшается. В целом по разрезу с увеличением поддонной глубины присутствие минерала в осадках становится ощутимее.

Ильменит. Черные угловато-окатанные, реже окатанные зерна неправильной и призматической формы, некоторые лейкоксенизированные,

иногда с неровной ямчатой поверхностью. Минерал является вторым по распространенности среди чернорудных (после магнетита) и титановых (после титанита). Встречается по всему разрезу, за исключением интервала 198–203 см. Среднее содержание составляет 6.5%, максимальное — 18.2%. Основные скачки регистрируются в краевых частях разреза. Для внутреннего фрагмента характерна повышенная частота колебаний при сравнительно небольшом размахе. Линия тренда свидетельствует о нарастании содержания ильменита вглубь осадков.

Гетит. Красноватокоричневые и охристые угловато-окатанные и окатанные зерна неправильной и пластинчатой формы, иногда с ямчатой поверхностью, встречаются агрегаты. Гетит не обнаружен только в одной пробе (интервал 188–193 см), что позволяет говорить об устойчивом присутствии в осадочном разрезе. Среднее содержание составляет 5.7%. В вертикальном профиле прослеживается два относительно обогащенных гетитом интервала (0–73, 143–203 см). В верхнем интервале установлен абсолютный максимум 55.6%, в нижнем содержание не превышает 10.8%. В оставшихся фрагментах колонки доля минерала составляет в среднем 1.2%. Если говорить обобщенно, то вниз по профилю она стремительно убывает.

Роговая обманка. Зеленые, темно-зеленые (почти непрозрачные), редко светло-зеленые и синевато-зеленые угловато-окатанные и окатанные зерна преимущественно призматической формы. Наблюдаются закругленные и “рваные” окончания зерен. Иногда содержат мелкие включения черного вещества. В среднем тяжелая фракция осадков содержит 3.1% роговой обманки. Минерал диагностируется по всему профилю, кроме интервала 123–128 см. На кривой содержания выделяется три основных пика примерно одной высоты, достаточно равномерно рассредоточенных по колонке. Самый верхний, расположенный на глубине 33–38 см и соответствующий значению 9.6%, представляет абсолютный максимум. Между тремя этими пиками, ограниченными очень резкими “провалами” содержания, а также в кровле и в основании колонки отмечаются значительно меньшие перепады. Линия тренда почти параллельна оси ординат с отмеченными на ней поддонными глубинами; тенденция к уменьшению содержания вниз по разрезу проявлена очень слабо.

Лейкоксен. Белые и желтоватые, часто ватовидные угловато-окатанные и окатанные зерна

неправильной формы. Среднее содержание — 2.8%. Присутствие в разрезе почти постоянное: выявлено всего две “пустые” пробы на поддонных глубинах 183–188 и 193–198 см. В первом метре колонки колебания носят умеренный характер с нарастанием амплитуды ближе к периферии. Дальше по разрезу они становятся значительнее, в интервале 198–203 см зарегистрирован абсолютный максимум — 8.6%. В целом вглубь осадков вклад лейкоксена в минеральный состав становится весомее.

Гиперстен. Буровато-зеленые и розовато-зеленоватые, часто загрязненные включениями угловато-окатанные зерна призматической формы с едва заметным плеохроизмом. Содержание по колонке низкое, в среднем — 2.2%. Тем не менее зафиксированный в 96% проб (нет в пробах из интервалов 178–283, 188–193 см) гиперстен может считаться постоянным компонентом осадков. Верхние 50 см разреза обеднены минералом, среднее содержание на участке 0–50 см составляет всего 1.6%. Для остальной части колонки это, соответственно, 2.4%. Наиболее высокие точечные значения, включая абсолютный максимум 5.8%, отмечены в нижней части разреза. В общем по профилю гиперстен обнаруживает распределение, близкое к равномерному, с едва заметным убыванием содержания от верхних горизонтов осадков к нижним.

Гематит. Черные угловато-окатанные зерна неправильной формы. Небольшое количество минерала регистрируется по всей длине колонки, за исключением интервалов 168–178 и 188–193 см, где минерал не обнаружен. Частота встречаемости, таким образом, составляет 94%. В самой верхней части разреза содержание заметно превышает среднее по колонке — 3.4% против 1.9% при локальном максимуме 5.6%. Абсолютный максимум установлен в центральной части разреза (6.4%, интервал 118–123 см). Остальные части колонки демонстрируют более ровный характер распределения. В целом наблюдается уменьшение количества гематита сверху вниз по разрезу.

Циркон. Бесцветные, реже розовато-красноватые кристаллы дипирамидально-призматического облика и хорошо окатанные эллипсоидные зерна, а также их обломки. Нередко содержат включения мелких кристаллов циркона и газовой-жидкие включения. Количество в осадках незначительное, но достаточно устойчивое, с общей тенденцией к росту вниз по профилю. Частота встречаемости составляет

90% (циркон не выявлен в интервалах 163–168, 178–198 см), среднее содержание — 1.7%. Наиболее значительные пики содержания располагаются на поддонных глубинах 23–28, 78–83, 198–203 см и характеризуются ростом значений вниз по разрезу — 3.6, 4.6 и 6.6% соответственно. Последнее значение представляет собой абсолютный максимум.

Корунд. Синевато- и желтовато-серые угловатые и угловато-окатанные зерна неправильной формы, обычно с включениями черного вещества. Минерал присутствует в большей (67%) части просмотренных проб. Среднее содержание в колонке — 1.2%. Основные максимумы установлены при анализе материала из интервалов 43–48 см (6%), 98–103 см (3.6%) и 173–193 см (8.8% — абсолютный максимум, 8.0 и 4.2%). Между этими максимумами зафиксирован ряд более мелких всплесков содержания. Крайние фрагменты колонки, в особенности нижний, обеднены корундом. Судя по линии тренда, для осадочного разреза характерна общая слабовыраженная тенденция к росту содержания минерала по направлению к глубоким горизонтам.

Карбонаты. Бесцветные угловато-окатанные и окатанные зерна таблитчато-призматической формы. Частота встречаемости и среднее содержание в тяжелой фракции находятся на низком уровне — 14 и 0.1% соответственно. Это то остаточное количество карбонатов (возможно, в агрегатах с глинистыми частицами), которое не удалось извлечь при солянокислотном разложении проб; значительное влияние на величину общей карбонатности исключено. Абсолютный максимум (6.6%) диагностирован в основании колонки, гораздо меньший пик (1.6%) — на поддонной глубине 178–183 см. В верхней части профиля, включая приповерхностный слой, отмечено несколько малозначительных всплесков содержания. В целом при движении вглубь разреза роль карбонатов в минеральном составе осадков возрастает.

Рутил. Желто-бурые и буро-красные (почти непрозрачные) угловато-окатанные призматические кристаллы с дипирамидальными окончаниями, хорошо окатанные эллипсоидальные зерна и неправильные обломки. Частота встречаемости в тяжелой фракции проб высокая — 88%. В среднем в осадках заключено 0.7% рутила. От кровли к центральной части колонки количество минерала постепенно нарастает. Затем, после периода спада и полного отсутствия в осадках (интервалы 118–173 и 173–193 см со-

ответственно), рутил демонстрирует очень резкий скачок содержания до абсолютного максимума (2.4%, двухвершинный пик). За очередным понижением следует общий рост количества рутила в основании колонки. В целом для разреза характерна тенденция к увеличению содержания с глубиной.

Турмалин. Буроватые и зеленовато-коричневые угловато-окатанные и окатанные зерна призматической формы с заметным плеохроизмом. Весьма распространенный в осадках минерал. Выявлен в 80% проб. Среднее содержание в тяжелой фракции — 0.7%. Наиболее высокое содержание (1.8%) установлено сразу в нескольких рассредоточенных по колонке интервалах. В общем картина распределения характеризуется существенными перепадами значений со слабовыраженной тенденцией понижения содержания вниз по разрезу.

Силлиманит. Серые, светло-коричневые, редко бледно-зеленые угловато-окатанные и окатанные зерна шестоватой и волосовидной формы. Незначительное количество минерала, в среднем 0.7%, обнаружено в 67% проанализированных проб. В целом прослеживается тенденция увеличения содержания вниз по разрезу. Верхние 60 см осадков почти лишены силлиманита. Глубже распределение принимает скачкообразный характер — от полного отсутствия минерала в пробах до значения 2.6%. Это абсолютный максимум, зафиксированный в интервалах 138–143 и 163–168 см. В самой нижней части колонки содержание выравнивается и составляет 0.2%.

Ставролит. Золотисто-желтые угловато-окатанные и окатанные зерна неправильной формы, нередко с мелкими округлыми газово-жидкими включениями и минеральной пылью. Частота встречаемости в осадочном разрезе и среднее содержание в тяжелой фракции составляют соответственно 67 и 0.4%. Линия тренда указывает на некоторый рост количества ставролита с глубиной. Абсолютный пик содержания (2.2%) установлен на поддонной глубине 198–203 см. Он находится в “обрамлении” протяженных интервалов, демонстрирующих полное отсутствие минерала в составе осадков. Самая верхняя часть разреза отличается содержанием, сильно пониженным относительно среднего значения, нижняя, напротив, — существенно повышенным (0.1 и 0.8% соответственно).

Хлоритоид. Темно- и грязно-зеленые угловато-окатанные и окатанные зерна пластин-

чато-гексагональной формы, часто с мелкими черными включениями. Минерал обнаружен в 55% проб. Его количество не превышает 0.8% при среднем значении 0.2%. Наиболее обогащены хлоритоидом осадки из самой верхней части колонки, а также из интервалов 153–158 и 223–243 см (двухвершинный пик). Самый протяженный участок колонки, где хлоритоид отсутствует, находится на поддонной глубине 163–213 см. В общем вниз по разрезу достаточно отчетливо проявляется спад содержания.

Тремолит. Бесцветные или слабо-зеленоватые угловато-окатанные зерна призматической формы. Минерал выявлен лишь в пятой части проб в ничтожно малом количестве — 0.1% в среднем по колонке. Пробы с тремолитом локализуются в интервалах 13–48 см (содержание достигает 1.0%), 103–118 см (до 2.0%, абсолютный максимум) и 238–248 см (до 1.8%). Судя по линии тренда, для минерала характерно практически равномерное распределение с едва различимым уменьшением содержания вниз по разрезу.

Брукит. Желто- и темно-бурые угловато-окатанные зерна таблитчатой и призматической формы, иногда со штриховкой на гранях. Минерал встречается в колонке фрагментарно с частотой 27%. Содержание в тяжелой фракции чрезвычайно низкое и составляет в среднем 0.1% при общем слабовыраженном снижении по направлению к основанию разреза. Абсолютный максимум (0.8%) обнаружен на поддонной глубине 163–168 см.

Апатит. Бесцветные угловато-окатанные и окатанные зерна призматической формы, часто с пылевидными включениями. Диагностированный только в 16% проб минерал демонстрирует точечное распространение. Среднее содержание в тяжелой фракции осадков — 0.1%. Верхняя часть разреза приблизительно полуметровой мощности относительно обогащена апатитом; в интервале 28–38 см установлен абсолютный максимум 1.2%. Далее по разрезу амплитуда колебаний затухает. Нижняя часть профиля, начиная с глубины 158 см, полностью лишена апатита. В целом от приповерхностных осадков к нижним горизонтам количество минерала убывает.

Оливин. Зеленоватые окатанные зерна призматической формы, имеющие закругленные ограничения. Частота встречаемости в тяжелой фракции осадков составляет 20%, среднее содержание — 0.1%. Вниз по разрезу наблюдается общее понижение количества оливина. Присут-

стве в осадках диагностируется по отдельным небольшим пикам, рассредоточенным по всей длине колонки, за исключением значительного по протяженности интервала 128–223 см, где оливин отсутствует. Абсолютный максимум (0.4%) отмечен сразу в нескольких пробах с поддонных глубин 28–33, 83–88 и 123–128 см.

Биотит. Минерал представлен коричневыми тонкими угловато-окатанными пластинками. Является редким: диагностирован лишь в 12% проб, среднее содержание стремится к нулю и, судя по линии тренда, понижается к основанию разреза. На фоне общего отсутствия минерала в осадках отмечаются небольшие одиночные всплески содержания, которые локализуются ближе к центральной части колонки. Наиболее значительное количество биотита (0.4%) встречено в интервале 103–108 см. О содержании биотита в легкой фракции — см. предыдущий подраздел.

Анализ. Синие угловато-окатанные таблитчатые с дипирамидальными окончаниями зерна. Минерал выявлен в единичной пробе из интервала 153–158 см в количестве 0.4%. В целом анализ нетипичен для изученного разреза.

Взаимоотношения минералов. Связь с цветом осадков. На основе рассчитанных коэффициентов корреляции r установлены количественные отношения, существующие между отдельными минералами и их группами в составе тонкой и мелкопесчаной фракции осадков Чукотского плато (внутренние связи; см. рис. 2, 3). Дана характеристика среднего минерального состава осадков различного цвета (внешние связи; табл. 3).

Среди породообразующих минералов особенно крепкими прямыми связями обладают кварц с калишпатами, полевые шпаты с плагиоклазами (то есть плагиоклазы являются преобладающими минералами в группе полевых шпатов), а также с чернорудными минералами в целом, хлоритоидом, гранатами, ильменитом, рутилом, цирконом ($r \geq 0.38$, перечисление идет в порядке ослабления связи). При этом и у кварца, и у полевых шпатов имеется обратная зависимость от количества в осадках слюдисто-глинистых агрегатов ($r = -0.88, -0.75$ соответственно). У преобразованных растительных остатков и угля единственная значимая связь фиксируется также с агрегатами (сильная обратная, $r = -0.75$). Последние положительно коррелируют (0.28) только с пиритом. Из аксессуаров самыми многочисленными и исключительно прямыми

значимыми связями характеризуется группа чернорудных минералов: корреляция установлена со всеми представителями чернорудных минералов, а также с отдельными минералами титана и группой титановых минералов в целом, минералами группы эпидота, гранатами, ставролитом, цирконом, корундом — вообще с большинством встреченных в разрезе силикатов и алюмосиликатов. Распределение по профилю группы титановых минералов практически полностью контролируется входящими в ее состав титанитом и ильменитом. Помимо естественной сильноположительной корреляции с остальными членами группы, особо прочная связь отмечается с гранатами, цирконом, минералами группы эпидота, ставролитом, хлоритоидом ($r \geq 0.91$). Высокая степень взаимозависимости ($r \geq 0.90$) наблюдается между гранатами и ильменитом, цирконом, титанитом, титановыми минералами в целом, минералами группы эпидота, рутилом, лейкоксеном; статистически значимых обратных связей не зафиксировано. Пироксены, в составе которых главная роль принадлежит диопсид-авгиту, а второстепенная гиперстену (отражено в том числе в коэффициентах корреляции), наиболее тесно “взаимодействуют” с минералами группы эпидота, титанитом и вообще титановыми минералами, цирконом, группой граната, ильменитом, рутилом, турмалином ($r \geq 0.71$), не демонстрируя при этом каких-либо статистически значимых обратных связей. Пирит, этот единственный представитель класса сульфидов в колонке, кроме слабой прямой связи со слюдисто-глинистыми агрегатами обладает весьма слабо выраженной обратной зависимостью от содержания калишпатов ($r = -0.30$).

Наиболее зримо специфика минерального состава проявляется в цвете донных отложений. Описанные в колонке НСГ-17 осадки разделены по цветовому признаку на несколько групп (рис. 2). В группу коричневых осадков включены светло-коричневые, коричневые и темно-коричневые разности. Они особенно обогащены карбонатами, эпидотом, диопсид-авгитом, роговой обманкой, лейкоксеном, гиперстеном, хлоритоидом, содержат относительно много преобразованных растительных остатков и угля (табл. 3). Свою группу образуют оливковые осадки. Это бескарбонатные отложения с максимальным содержанием кварца, гетита, гематита, апатита, очень резким пиком магнетита и значительным выходом тяжелой фракции при минимуме гранатов, титанита, ильменита, роговой обманки,

Таблица 3. Колонка НСГ-17, Чукотское плато: общая карбонатность, содержание основных гранулометрических фракций и минеральный состав тонкого и мелкого песка в осадках различного цвета (средние значения), %

Минералы	Цветотипы осадков				
	коричневые, n = 2	оливковые, n = 1	серые, n = 8	бежевые, n = 4	пестрые, n = 16
Общая карбонатность*	18.8	0.0	9.4	15.4	14.8
Гранулометрические фракции**					
Песок, в том числе	7.57	2.77	1.91	6.70	2.66
тонкий и мелкий	4.62	2.08	1.43	5.96	1.85
Алеврит	28.19	17.46	22.73	27.14	23.51
Пелит	43.76	78.34	64.32	50.07	57.66
Легкая минеральная фракция					
Кварц	52.2	67.6	47.5	60.2	53.4
Плагиоклазы	20.6	16.8	9.8	24.7	20.4
Калишпаты	4.8	3.2	2.5	7.5	3.8
Агрегаты	20.2	12.4	40.2	7.6	20.9
Уголь***	2.2	ед.зн.	ед.зн.	ед.зн.	1.6
Выход фракции	99.5	98.5	99.5	97.1	99.3
Тяжелая минеральная фракция					
Группа граната	15.8	9.4	9.8	22.9	15.8
Группа эпидота	18.3	9.4	8.4	17.9	14.3
Магнетит	6.3	40.2	14.9	5.3	13.5
Пирит	5.3	2.8	26.3	2.5	11.7
Титанит	8.0	5.4	7.8	14.4	8.6
Диопсид-авгит	10.2	6.2	5.3	8.6	9.8
Ильменит	10.7	3.8	7.1	11.8	5.1
Гетит	5.8	11.0	5.9	1.7	6.2
Роговая обманка	5.5	1.0	2.5	1.9	2.3
Лейкоксен	4.5	1.2	1.8	3.7	2.6
Гиперстен	3.0	2.0	1.9	1.0	2.3
Гематит	2.3	3.6	1.3	1.1	1.8
Циркон	1.4	1.0	1.5	2.3	1.8
Корунд	0.0	1.6	3.4	0.1	1.2
Рутил	0.5	0.4	0.8	0.6	0.7
Турмалин	0.1	0.4	0.4	0.6	0.9
Силлиманит	0.8	0.0	0.6	0.8	0.7
Ставролит	0.3	0.2	0.1	0.7	0.4
Хлоритоид	0.7	0.0	0.0	0.4	0.2
Тремолит	0.1	0.2	0.0	0.5	0.0
Карбонаты	0.3	0.0	0.2	1.7	0.1
Брукит	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2
Апатит	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1
Оливин	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
Выход фракции	0.5	1.5	0.5	2.9	0.7

Примечание. *Карбонаты в осадках представлены доломитом и кальцитом [23]. **Использована классификация Рухина [28], согласно которой песок включает в себя частицы размером 2–0.05 мм, в том числе тонкий и мелкий песок — 0.25–0.05 мм, алеврит — 0.05–0.005 мм, пелит — <0.005 мм. ***Уголь — уголь, углефицированные и минерализованные растительные остатки. Ед.зн. — единичные знаки. n — количество проб в группах, выделенных на основании цвета осадков. Несоответствие общему количеству проанализированных проб (50) объясняется тем, что в группы не включался материал, отобранный на границе осадков различного цвета и, следовательно, обладающий расплывчатыми характеристиками. Кроме перечисленных минералов, в части проб содержится незначительное количество обломков пород, биотита, мусковита, графита, хлорита и спикул губок (в основном знаки).

лейкоксена, циркона. К сероцветным осадкам отнесены светло-серые и серые разности. Они прежде всего демонстрируют ярко выраженный максимум содержания слюдисто-глинистых агрегатов и пирита. В то же время отмечается пониженный уровень карбонатности при особенно заметном обеднении кварцем, полевыми шпатами (плагиоклазы, калишпаты), минералами группы эпидота, диопсид-авгитом. Группа бежевых осадков объединяет бежево-серые и бежевые до белых разновидности. Отложения данного цветотипа, тяготеющие в своем распространении к нижней части разреза, примечательны повышенным содержанием карбонатов, кварца, минералов группы эпидота, лейкоксена, предельным — полевыми шпатами, гранатов, титанита, ильменита, циркона при экстремальном выходе тяжелой фракции. Доля слюдисто-глинистых агрегатов, магнетита, пирита, гетита, гиперстена и гематита минимальна. Тонкопереслаивающиеся осадки темно-коричневого, серого и бежевого цвета, которые встречаются в колонке чаще всего, обозначены как пестрые (пестроцветные). Для них типичны промежуточные значения содержания минералов и минеральных групп.

Литостратиграфия. В результате сопоставления с датированными колонками поднятий Менделеева и Нортвинд (морфоструктуры Чукотского бордерленда, смежные с Чукотским плато) [7, 44, 45] показано, что осадки колонки НСГ-17 накапливались в четвертичное время в условиях циклической смены ледниковых и межледниковых режимов седиментации (рис. 4). Указать более точные временные границы не так просто ввиду того, что для определения относительного геологического возраста, расчленения и корреляции отложений Арктического бассейна используются две стратиграфические модели, так называемые древняя [42, 44, 45] и молодая [35, 36]. Первая предполагает наличие в нижней части осадочного разреза отложений, сформировавшихся на границе палеомагнитных эпох Матуяма и Брюнес, что соответствует МИС 19 (рубеж эоплейстоцена и неоплейстоцена; около 800 тыс. лет назад). В рамках древней модели предельный возраст колонки НСГ-17 оценивается на уровне не менее МИС 12. Вторая, более употребительная модель (она подразумевает сравнительно высокую, порядка 1.5 см/тыс. лет, скорость седиментации и корреляцию нижних слоев осадочной толщи с МИС 7) в нашем случае дает значения, сопоставимые с МИС 6. Вообще стратиграфия осадков МИС 7 (МИС 19)

и древнее, вплоть до начала четвертичного периода, изучена крайне плохо; вполне вероятно, что все это время господствовал слабоконтрастный климат [19].

ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам минералогического анализа колонки НСГ-17 и дополнительным гранулометрическим и геохимическим данным, осадки южной части Чукотского плато весьма близки к четвертичным отложениям, которые аккумуляровались на других положительных морфоструктурах Чукотского бордерленда на протяжении последних сотен тысяч лет [7, 12, 44, 45 и др.] (рис. 4). Специфической чертой климата четвертичного периода, особенно в высоких широтах, является его ярко выраженная контрастность на фоне цикличности. Циклы “складываются” из чередующихся эпох — сравнительно протяженных холодных, включающих оледенения и иногда завершающихся терминациями (дегляциациями), и более коротких, но теплых межледниковых. Естественно, что изменения климата вели к трансформации условий седиментогенеза с перераспределением контролирующих факторов, включая диагенетический. По возрастанию интенсивности диагенетических преобразований осадки выстраиваются в следующем порядке: темно-коричневые и темно-желто-коричневые — оливково-коричневые и светло-оливково-коричневые — розовые — оливково-серые — серые и темно-серые (показано на примере четвертичных отложений поднятия Менделеева и прилегающих участков морского дна) [20]. При рассмотрении минерального состава различных по цвету осадков нашей колонки (рис. 2, схема колонки слева; табл. 3) будем придерживаться в общем той же последовательности.

Донные отложения коричневого цвета, прежде всего темно-коричневые, являются своеобразным показателем, маркирующим в осадочной толще периоды седиментации в условиях межледниковий или ярко выраженных интерстадиалов (нечетные морские изотопные стадии и подстадии). В межледниковые эпохи арктические шельфы были заняты морями (трансгрессия, высокий уровень моря), мощный ледниковый щит существовал только в Гренландии, имела место интенсивная поставка терригенного материала и растворенного марганца — в основном реками и в результате абразии берегов [18].

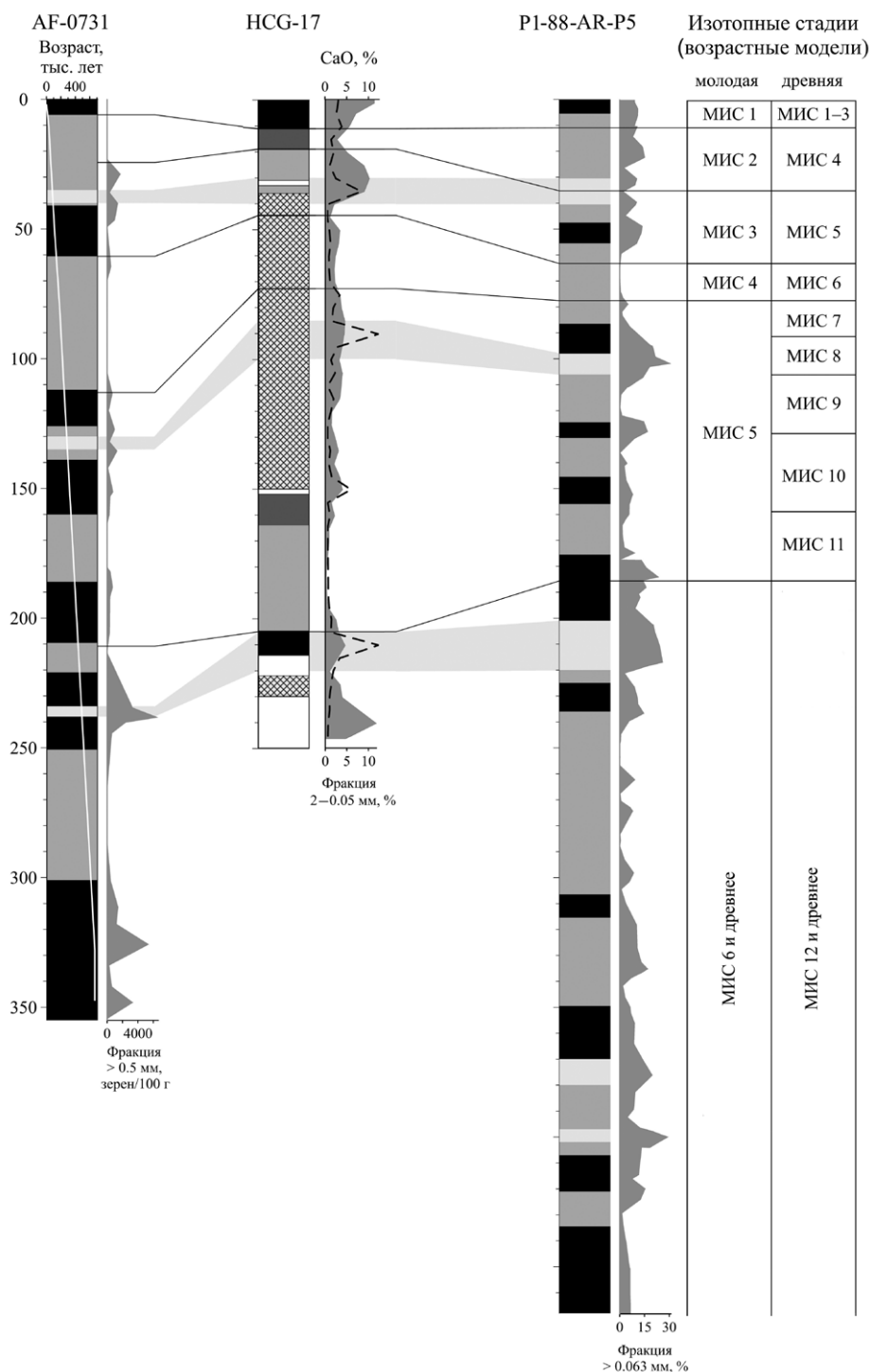


Рис. 4. Гипотетическая литостратиграфическая привязка осадков Чукотского плато (колонка HCG-17) к донным отложениям других подводных возвышенностей Чукотского бордерленда с позиций разных возрастных моделей. Поднятие Менделеева представлено на рисунке колонкой AF-0731 [7], хребет Нортвинд — колонкой P1-88-AR-P5 [44, 45]. Черным цветом во всех колонках отмечены коричневые осадки межледниковий, серым — сероцветные отложения холодных эпох. Справа от колонок помещены графики распределения в осадках крупнозернистого материала ледового и/или айсбергового разноса. Светло-серой полосой, проходящей через все колонки, обозначены прослой с большим количеством обломков карбонатных пород предположительно айсбергового разноса. Кроме того, в колонке HCG-17 темно-серым, белым цветом и перекрестной штриховкой выделены интервалы распространения оливковых, бежевых и пестроцветных осадков соответственно, справа пунктиром — содержание кальция [12]. МИС — морская изотопная стадия. Возрастной диапазон МИС, а также их соотношение в рамках древней и молодой возрастных моделей обозначены согласно [7].

Достаточно глубоко переработанное органическое вещество практически лишает осадки диагенетического ресурса [20]. Наиболее вероятно, что седиментация происходила в окислительной обстановке при высоких положительных значениях окислительно-восстановительного потенциала, со сравнительно свободной вентиляцией глубинных вод и насыщением их кислородом. Биологическая продуктивность была повышена; осадки межледниковий содержат значительное количество ископаемых остатков организмов и следов их жизнедеятельности. Перечисленные особенности находят отклик в минеральном составе колонки НСГ-17 (рис. 2, 3; табл. 3). Диагностированные в ней коричневые осадки демонстрируют относительную песчаность и повышенный уровень карбонатности — видимо, за счет органогенных карбонатов (раковин фораминифер) [2]. В осадках коричневого цвета распространены углистые частицы, углефицированные и минерализованные растительные остатки. В них же содержится комплекс акцессорных минералов (вплоть до пиковых значений), разнородных по степени устойчивости при выветривании и переносе, — гранатов, эпидота, ильменита, роговой обманки, силлиманита, хлоритоида, лейкоксена, пироксенов (общие сведения о минералах даются по [3, 4, 6, 16, 24, 28]). Преобладающая форма терригенных зерен — угловато-окатанная. Вероятно, накопление осадков коричневого цвета шло за счет более или менее удаленных областей питания с начальным химическим преобразованием минералов (пелитизация полевых шпатов, лейкоксенизация минералов титана), что обычно для верхних горизонтов коры выветривания.

Зеленые и серые тона в коричневых и желтых осадках появляются, как известно, при переходе от аэробного диагенеза к анаэробному в процессе микробиологической переработки органического вещества [5, 20, 21, 37]. Процесс сопровождается миграцией и удалением из донных отложений марганца, восстановлением окисного железа до закисного, сульфатредукцией. Глубина залегания границы, разделяющей коричневые и зеленые осадки, зависит от скорости седиментации и количества лабильного органического вещества. В нашем случае граница отстоит от поверхности дна на 11 см. Исходя из минералогических и некоторых других характеристик колонки НСГ-17 (табл. 3) [12], оливковые осадки по сравнению с серыми накапливались при повышенных значениях окисли-

тельно-восстановительного потенциала. В частности, мелкие выделения пирита, которым так резко обогащены сероцветные отложения изученного профиля, образуются главным образом в илах достаточно спокойных и глубоких вод при разложении органических остатков без доступа свободного кислорода (анаэробная стадия диагенеза, редукция сульфатов). Встреченные псевдоморфозы лимонита (гидратированная разновидность гетита) по пириту возникают следующим образом: “в зоне окисления пирит, как и большинство сульфидов, неустойчив, подвергаясь окислению до сульфата закиси железа, который при наличии свободного кислорода легко переходит в сульфат окиси железа. Последний, гидролизуясь, разлагается на нерастворимую гидроокись железа (лимонит) и свободную серную кислоту, переходящую в раствор” [4, с. 244]. Кроме лимонита, в процессе гидролиза образовались, очевидно, и агрегаты слюдисто-глинистого состава, широко распространенные в колонке НСГ-17 в целом и в сероцветных отложениях в особенности. В этом случае изменению подвергались породообразующие алюмосиликатные минералы (полевые шпаты). Оливковые и серые осадки являются самыми тонкозернистыми в колонке. Среднее содержание пелитовой (глинистой) фракции составляет 78.34 и 64.32% соответственно (табл. 3). По результатам рентгенофазового анализа [23], глинистая часть донных отложений Чукотского плато представлена глауконитом, каолинитом, хлоритом; регистрируются слабые пики палыгорскита, галита. Основная масса глинистых минералов в Северном Ледовитом океане имеет терригенную природу. Хлорит, который доминирует в отложениях Северной Пацифики, рассматривается в Арктическом бассейне как трассер проникновения тихоокеанских вод через Берингов пролив [11, 15, 39, 41]. Потенциальные источники каолинита в Северном Ледовитом океане, включая Амеразийский бассейн, сильно ограничены. Минералами группы каолинита обогащены некоторые мезозойские и кайнозойские отложения на севере Аляски и Канадской Арктики [32, 33, 39, 46]. Сильная корреляционная связь с содержанием песка свидетельствует в пользу поставки каолинита айсбергами, которые откалывались от Лаврентийского ледникового щита в периоды дегляциации [15, 32]. Глауконит, также тяготеющий к грубозернистым фракциям, массово встречается в осадках по периферии всех океанов. Главная область распространения — континентальный

склон с глубинами 500–2000 м. Глауконитсодержащие осадки занимают промежуточное положение между восстановленными отложениями приконтинентальной зоны, где в большей степени развит пирит, и окисленными илами ложа океана с преобладанием монтмориллонита, то есть представляют собой осадки переходного типа. Большинство исследователей относят глауконит к продуктам подводного выветривания (разрушение разнообразного силикатного материала осадков) либо диагенеза [22, 24, 26, 28, 29]. В любом случае это аутигенный минерал. Рост интенсивности глауконитообразования, как и аутигенного силикатообразования вообще, на окраинах морских бассейнов в кайнозойское время происходил на фоне постепенного длительного отступления моря, сопровождавшегося увеличением массы продуктов дезинтеграции пород континента в морских (океанических) бассейнах [26]. По всей совокупности признаков сероцветные отложения изученной колонки формировались в холодные эпохи (четные морские изотопные стадии и подстадии) при восстановительных либо приближенных к ним условиях и являются своеобразным индикатором таких условий в осадочном разрезе. При особенно сильных похолоданиях (во время ледниковий) обширные площади в границах современного арктического шельфа и прилегающих континентальных областей были заняты крупными ледниковыми щитами (регрессия, низкий уровень моря), осадочный материал в малых количествах поставлялся главным образом за счет ледовых агентов; Берингов пролив был закрыт, и водообмен с Мировым океаном происходил исключительно через пролив Фрама; осадки аккумуляровались при вероятно ослабленной вентиляции придонных вод [18]. Донным отложениям холодных эпох свойственны повышенная доля лабильного терригенного органического вещества и отчетливые диагенетические сигналы [20]. В формировании минерального состава крайне важную роль играет устойчивость минеральных видов к физическому выветриванию. В серых осадках колонки НСГ-17 своего верхнего предела достигает количественное отношение кварца к полевым шпатам (рис. 2, табл. 3). Аксессуары также демонстрируют тенденцию к нарастанию содержания минералов, весьма устойчивых к механическому разрушению (например, турмалин, рутил, корунд, брукит), на фоне общего сокращения относительно устойчивых и неустойчивых (гранаты, эпидот,

титанит, ильменит, лейкоксен, пироксены, амфиболы, гематит, ставролит, силлиманит).

Донные отложения светлых тонов, как и коричневые осадки колонки НСГ-17, заключают в себе большое количество карбонатов и частиц песчаной размерности (рис. 2, табл. 3). При этом фиксируется значительное до максимального содержание минералов, особенно устойчивых к выветриванию и перемещению, — кварца, плагиоклазов, калиевых полевых шпатов, гранатов, эпидота, титанита, турмалина, ставролита, циркона. Из среднеустойчивых минералов светлоцветные осадки обогащены, например, ильменитом (сюда же можно отнести еще менее устойчивый доломит, о котором сказано ниже). Отмечается спад содержания роговой обманки. Доля магнетита и малоустойчивого гиперстена вообще минимальна. Исчезает апатит. В целом все это указывает на поступление осадочного вещества преимущественно за счет дальнего переноса. Те светлоцветные отложения, которые, кроме прочего, характеризуются пиковой концентрацией кальция на фоне повышенного содержания крупнозернистой фракции, представляют собой так называемые карбонатные прослой (рис. 4, табл. 3). Главным источником кальция (карбоната кальция) в них служат обломки карбонатных пород — бесцветные полукатанные и окатанные зерна доломита и кальцита. Последнее подтверждается материалами, собранными в пределах Чукотского плато дрейфующими станциями “Чарли” и “Северный Полюс-2” (колонки, дражные пробы, фотографии дна) [10, 13], а также результатами ранее проведенных аналитических работ [2, 23]. Обогащенные карбонатами розоватые (цвет обусловлен присутствием оксигидроксидов железа и марганца) и белесые прослой регистрируются в осадочной толще всего Амеразийского бассейна при резком увеличении количества обломков на участках повышенного рельефа [20, 42–46 и др.]; мощность прослоев сокращается при удалении от Канадского Арктического архипелага в сторону хребта Ломоносова. С опорой на данные химического анализа показано, что розовые осадки образовались в восстановительных условиях, причем первичная аккумуляция происходила в холодные эпохи, главным образом при дегляциации [20, включая ссылки внутри]. Вообще преобладает мнение, согласно которому карбонатные прослой — это продукт айсбергового разноса терригенных карбонатов, в основном доломита, из палеозойских толщ

островов архипелага в периоды активной деградации Лаврентийского ледникового щита; не исключено, что некоторое количество карбонатов поступило с хребта Брукс, расположенного на севере Аляски [31, 46, 47]. В нашей колонке, кроме терригенных, содержатся уже упомянутые органогенные (раковины фораминифер) и, вероятно, аутигенные (диагенез) карбонаты [2]. Последнее предположение не подтверждается модельными расчетами, согласно которым сегодня в осадках южной части Чукотского плато, в пределах поля покмарков, происходит в основном растворение карбонатных минералов [23]. Единственное исключение — колонка НСГ-13, где “на поддонной глубине 138 см существуют условия, благоприятные для формирования аутигенных доломитов” [23, с. 49]. Эта колонка получена в северной части поля — на участке, максимально удаленном от места отбора колонки НСГ-17 (рис. 1).

Пестроцветные отложения, которые, судя по колонке НСГ-17, представлены на Чукотском плато чередующимися маломощными (до 1 мм) темно-коричневыми, серыми и бежевыми прослоями, распространены и на других возвышенностях Американо-Чукотского бассейна, например на поднятии Менделеева с примыкающим континентальным склоном Восточно-Сибирского моря [20]. По всей вероятности, основной горизонт пестроцветных осадков, в нашем случае расположенный на поддонной глубине 36–150 см и демонстрирующий маловыразительные (нейтральные) значения минералогических и других характеристик (табл. 3) [12], сформировался в нестабильных климатических условиях МИС 3–МИС 5. Согласно общему описанию последнего климатического цикла [19], в холодную эпоху МИС 5.4–МИС 2 имел место целый ряд оледенений, стадиалов, интерстадиалов. Пестроцветные отложения отличаются от серых более высоким окислительно-восстановительным потенциалом среды седиментации и менее выраженным диагенетическим сигналом [20]. Кроме того, пестрые осадки максимально развиты в фации подводного поднятия, тогда как сероцветные чаще встречаются в фации глубоководья морского бассейна и в фации осадков континентального склона (выводы построены на статистически обработанных данных химического анализа) [20].

До сих пор обсуждалась возможность привноса обломочного материала в осадки Чукотского плато из расположенных на суше источников,

за счет абразии берегов, ледового и айсбергового разноса. Однако следует отметить, что в Американо-Чукотском бассейне на участках дна с сильно расчлененным рельефом (например, поднятия Менделеева, Нортвинд, Альфа) по ряду геологических признаков предполагаются местный размыв коренных пород и его основополагающая роль в аккумуляции осадков [10]. На южной окраине Чукотского плато в поле распространения донных воронок также сложились условия, благоприятные для развития склоновых процессов и, как следствие, — элювиально-делювиальных осадков (см. раздел “Район исследования” и упомянутые в нем литературные источники). По разрезу грунтовых колонок из этого района, главным образом колонки НСГ-12, зарегистрированы переотложенные микропалеонтологические остатки [2]. Последнее свидетельствует в пользу эпизодов обнажения и разрушения пород в бортах воронок: “в четвертичные осадки начали поступать диатомеи из кайнозойских преимущественно глубоководных морских отложений, споры и пыльца из мезозойских и палеозойских прибрежно-морских и континентальных” [2, с. 675]. Наиболее заметные изменения предположены в конце МИС 3. Минералогические признаки разгрузки на морское дно флюидов в пределах воронок не выявлены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Иммерсионный анализ тонко- и мелкопесчаной фракции осадков колонки НСГ-17 позволил проследить климатически обусловленные минералогические изменения, которые происходили в донных отложениях южной окраины Чукотского плато (поле похожих на покмарки морфоструктур) с плейстоцена и до современной эпохи включительно. Главными породообразующими минералами в изученном разрезе являются кварц, плагиоклазы и калиевые полевые шпаты. Значительна роль слюдисто-глинистых агрегатов. Среди аксессуаров преобладает группа черных рудных и титановых минералов (ядро группы составляют магнетит, титанит, ильменит), а также гранаты, минералы группы эпидота, пироксены, пирит. Большинство зерен минералов имеет угловато-окатанную форму, иногда отмечаются ямчатость, шероховатость. Вертикальные изменения по колонке носят циклический характер и отчетливее всего проявляются в распределении аксессуарных минералов — их ассоциациях, степени устойчивости

к различным видам выветривания и транспортировке. Цикличность обусловлена нестабильностью климата в антропогене: имело место неоднократное чередование периодов похолодания и потепления. Осадки, которые накапливались в эти периоды, обладают контрастным минеральным составом.

Коричневые донные отложения, соответствующие теплым межледниковым эпохам без мощного покровного ледника (нечетные морские изотопные стадии и подстадии), формировались в условиях повышенной биологической продуктивности и динамической активности среды. На это, в частности, указывают весомое количество биогенных карбонатов, присутствие углистых частиц и преобразованных растительных остатков, существенное до максимума содержание аксессуаров различной абразивной прочности, химической устойчивости и миграционной способности (гранаты, эпидот, ильменит, роговая обманка, силлиманит, хлоритоид, лейкоксен, пироксены). Обнаруживаются следы химического выветривания (пелитизация полевых шпатов, лейкоксенизация минералов титана).

Серые осадки холодных эпох, включая оледенения (четные морские изотопные стадии и подстадии), отличаются существенной долей минеральных видов, резистентных к действию физических процессов (кварц в сопоставлении с полевыми шпатами, циркон, турмалин, рутил, корунд, брукит и др.), широким распространением слюдисто-глинистых агрегатов и пирита — продуктов химического выветривания и диагенеза соответственно. В эпохи оледенений территория современного шельфа Арктики и окружающей суши была занята крупными ледниковыми щитами, а водообмен сильно ограничен. Седиментация протекала в восстановительных условиях.

Оливковые и бежевые донные отложения, в том числе обогащенные кластическими карбонатами (карбонатные прослойки), формировались в обстановках, переходных от ледниковых к межледниковым. Осадки оливкового цвета характеризуются прежде всего предельным содержанием кварца, магнетита, гематита (частично в виде псевдоморфоз по пириту), гематита, повышенным выходом тяжелой фракции и отсутствием карбонатов. Из отличительных особенностей бежевых осадков, кроме высокого уровня карбонатности (доломит, в меньшей степени кальцит) и экстремального выхода тяжелой фракции, можно отметить значительное

до пикового содержание минералов, устойчивых к основным внешним воздействиям — механическому выветриванию и переносу. Это кварц, полевые шпаты, гранаты, эпидот, титанит, турмалин, ставролит, циркон, ильменит. Вероятно, перенос происходил во время дегляциации и осуществлялся айсбергами со стороны Канадского Арктического архипелага и хребта Брукс на Аляске.

Пестроцветные отложения, которые аккумуляровались в условиях весьма нестабильного климата между третьей и пятой морскими изотопными стадиями, представлены тонкопереслаивающимися осадками темно-коричневого, серого и бежевого цвета и демонстрируют среднее содержание практически всех минералов.

Таким образом, донные отложения, накопленные за четвертичное время в пределах покмаркообразных структур южной части Чукотского плато, имеют преимущественно терригенный состав (материал из удаленных областей сноса, в том числе айсбергов, при возможной незначительной поставке со стороны местных источников), слабопреобразованный процессами аутигенного минералообразования, без признаков дефлюидизации.

Благодарности. Авторы благодарят коллег из ТОИ ДВО РАН, ВНИИОкеангеологии, ИЗК СО РАН за помощь в организации и проведении экспедиционных и аналитических работ.

Источник финансирования. Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 17-77-10043).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Астахов А. С., Босин А. А., Колесник А. Н. и др. Геологические исследования в Чукотском море и прилегающих районах Северного Ледовитого океана в экспедиции RUSALCA-2009 // Тихоокеанская геология. 2010. Т. 29. № 6. С. 110-116.
2. Астахов А. С., Маркевич В. С., Колесник А. Н. и др. Возможные условия и время формирования покмарков Чукотского плато // Океанология. 2014. Т. 54. № 5. С. 665-678.
3. Бергер М. Г. Терригенная минералогия. М.: Недра, 1986. 227 с.
4. Бетехтин А. Г. Курс минералогии: Учебное пособие. М.: Изд-во КДУ, 2007. 721 с.
5. Волков И. И. Окислительно-восстановительные процессы диагенеза осадков // Геохимия донных осадков / Отв. ред. Волков И. И. М.: Наука, 1979. С. 363-413.
6. Геологический словарь: в 2-х томах / Отв. ред. Паффенгольц К. Н. М.: Недра, 1978. 487 с. (т. 1), 456 с. (т. 2).
7. Гусев Е. А., Кузнецов А. Б., Талденкова Е. Е. и др. Скорость и условия накопления позднекайнозойских

- осадков поднятия Менделеева: Sr-изотопная и $\delta^{18}\text{O}$ -хемостратиграфия // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 3. С. 336-340.
8. Данилов И. Д. Полярный литогенез. М.: Недра, 1978. 238 с.
 9. Кабаньков В. Я., Андреева И. А. О геологической истории глубоководной части Амеразийского суббассейна // 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2008. С. 293-305.
 10. Кабаньков В. Я., Андреева И. А., Иванов В. Н., Петрова В. И. О геотектонической природе системы Центрально-Арктических морфоструктур и геологическое значение донных осадков в ее определении // Геотектоника. 2004. № 6. С. 33-48.
 11. Калинин В. В. Глинистые минералы в осадках Арктических морей // Литология и полезные ископаемые. 2001. № 4. С. 418-429.
 12. Колесник А. Н., Босин А. А., Колесник О. Н. и др. Цветностно-яркостные характеристики в литостратиграфии донных отложений Чукотского плато, Северный Ледовитый океан // Геохимия. 2018. № 3. С. 258-268.
 13. Кроми В. Дж. Предварительные результаты исследований арктической дрейфующей станции "Чарли" // Геология Арктики. М.: Мир, 1964. С. 440-454.
 14. Крылов А. А., Шилов В. В., Андреева И. А., Миролюбова Е. С. Стратиграфия и условия накопления верхнечетвертичных осадков северной части поднятия Менделеева (Амеразийский бассейн Северного Ледовитого океана) // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 2 (88). С. 7-22.
 15. Крылов А. А., Штайн Р., Ермакова Л. А. Глинистые минералы как индикаторы условий позднечетвертичного осадконакопления в районе поднятия Менделеева, Амеразийский бассейн Северного Ледовитого океана // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 6. С. 507-521.
 16. Лапина Н. Н., Савинова А. И. Методика комплексного исследования вещественного состава терригенных морских осадков // Геология моря. Вып. 1. Л.: НИИГА, 1971. С. 92-113.
 17. Левитан М. А. Адвекция атлантических вод в Арктику в четвертичное время (обзор) // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 1. М.: ГЕОС, 2009. С. 54-63.
 18. Левитан М. А. Скорости седиментации отложений последних пяти морских изотопных стадий в Северном Ледовитом океане // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 470-479.
 19. Левитан М. А., Сыромятников К. В., Кузьмина Т. Г. Некоторые литолого-геохимические особенности современной и четвертичной седиментации в Северном Ледовитом океане // Геохимия. 2012. № 7. С. 627-643.
 20. Левитан М. А., Сыромятников К. В., Рощина И. А., Штайн Р. Соотношение цвета и химического состава четвертичных донных осадков из южной части поднятия Менделеева и континентального склона Восточно-Сибирского моря // Геохимия. 2014. № 3. С. 223-248.
 21. Леин А. Ю. Биогеохимические процессы раннего диагенеза в современных отложениях морей Российской Арктики // Материалы VII Всероссийского литологического совещания "Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории". Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. Т. 2. С. 163-165.
 22. Лисицына Н. А., Бутузова Г. Ю. К вопросу о генезисе океанических глауконитов // Литология и полезные ископаемые. 1981. № 5. С. 91-97.
 23. Логвина Е. А., Матвеева Т. В., Гладыш В. А., Крылов А. А. Комплексные исследования покмарков на Чукотском плато // Проблемы Арктики и Антарктики. 2011. № 2 (88). С. 45-54.
 24. Логвиненко Н. В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования). М.: Высшая школа, 1984. 416 с.
 25. Малахов М. И., Малахова Г. Ю., Соляников Я. Л. и др. Петромагнитные исследования донных осадков покмарков на Чукотском плато // Сборник статей VII Всероссийского совещания по изучению четвертичного периода "Фундаментальные проблемы, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований". Ростов-на-Дону, 10-15 июня 2013 г. Ростов н/Д: ЮНЦ РАН, 2013. С. 413-415.
 26. Николаева И. В. Минералы группы глауконита в осадочных формациях. Новосибирск: Наука, 1977. 322 с.
 27. Рекант П. В., Миролюбова Е. С., Андреева И. А., Смирнова Л. С. Сравнительный анализ минеральных ассоциаций донных отложений прилаптевоморского сегмента хребта Ломоносова и поднятия Менделеева как один из критериев оценки источников обломочного материала // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. № 4 (98). С. 79-95.
 28. Рухин Л. Б. Основы литологии. Учение об осадочных породах. Л.: Недра, 1969. 703 с.
 29. Фролов В. Т. Литология. Кн. 1.: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с.
 30. AMAP Assessment Report: Arctic Pollution Issues. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Norway, Oslo, 1998. 859 p.
 31. Bischof J. F., Clark D. L., Vincent J.-S. Origin of ice-rafted debris: Pleistocene paleoceanography in the western Arctic Ocean // Paleocyanography. 1996. V. 11. № 6. P. 743-756.
 32. Dalrymple R. W., Maass O. C. Clay mineralogy of late Cenozoic sediments in the CESAR cores, Alpha Ridge, central Arctic Ocean // Canadian Journal of Earth Sciences. 1987. V. 24. № 8. P. 1562-1569.
 33. Darby D. A. Kaolinite and other clay minerals in Arctic Ocean sediments // Journal of Sedimentary Petrology. 1975. V. 45. № 1. P. 272-279.
 34. Grantz A., Clark D. L., Phillips R. L. et al. Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada basin, and the geometry and timing of rifting in the Amerasia basin, Arctic Ocean // Geological Society of America Bulletin. 1998. V. 110. № 6. P. 801-820.
 35. Jakobsson M., Løvlie R., Al-Hanbali H. et al. Manganese and color cycles in Arctic Ocean sediments

- constrain Pleistocene chronology // *Geology*. 2000. V. 28. № 1. P. 23-26.
36. *Jakobsson M., Løvlie R., Arnold E.M. et al.* Pleistocene stratigraphy and paleoenvironmental variation from Lomonosov Ridge sediments, central Arctic Ocean // *Global and Planetary Change*. 2001. V. 31. № 1-4. P. 1-22.
37. *März C., Stratmann A., Matthiessen J. et al.* Manganese-rich brown layers in Arctic Ocean sediments: Composition, formation mechanisms, and diagenetic overprint // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2011. V. 75. № 23. P. 7668-7687.
38. *Mayer L.A., Brumley K., Andronikov A. et al.* Resent mapping and sampling on the Chukchi Borderland and Alpha/Mendelev Ridge // *Eos Transactions of the American Geophysical Union*. V. 89. № 53. Fall Meet. Suppl., 2008. Abstract C11C-0516.
39. *Naidu A.S., Mowatt T.C.* Sources and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental-shelf areas off Alaska // *Geological Society of America Bulletin*. 1983. V. 94. № 7. P. 841-854.
40. *Nørgaard-Pedersen N.* Late Quaternary Arctic Ocean sediment records: Surface ocean conditions and provenance of ice-rafted debris // *GEOMAR Report*. 1997. № 65. 107 p.
41. *Ortiz J.D., Polyak L., Grebmeier J.M. et al.* Provenance of Holocene sediment on the Chukchi-Alaskan margin based on combined diffuse spectral reflectance and quantitative X-Ray Diffraction analysis // *Global and Planetary Change*. 2009. V. 68. № 1-2. P. 73-84.
42. *Phillips R.L., Grantz A.* Quaternary history of sea ice and paleoclimate in the Amerasia Basin, Arctic Ocean, as recorded in the cyclical strata of Northwind Ridge // *Geological Society of America Bulletin*. 1997. V. 109. № 9. P. 1101-1115.
43. *Polyak L., Curry W.B., Darby D.A. et al.* Contrasting glacial/interglacial regimes in the western Arctic Ocean as exemplified by a sedimentary record from the Mendelev Ridge // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 2004. V. 203. № 1-2. P. 73-93.
44. *Poore R.Z., Ishman S.E., Phillips R.L., McNeil D.H.* Quaternary stratigraphy and paleoceanography of the Canada Basin, western Arctic Ocean // *U.S. Geological Survey Bulletin* 2080. Washington: U.S. Government Printing Office, 1994. 32 p.
45. *Poore R.Z., Phillips R.L., Rieck H.J.* Paleoclimate record for Northwind Ridge, western Arctic Ocean // *Paleoceanography*. 1993. V. 8. № 2. P. 149-159.
46. *Stein R., Matthiessen J., Niessen F. et al.* Towards a better (litho-) stratigraphy and reconstruction of Quaternary paleoenvironment in the Amerasian Basin (Arctic Ocean) // *Polarforschung*. 2010. V. 79. № 2. P. 97-121.
47. *The Geology of Alaska* / Eds. Plafker G., Berg H.C. Boulder: Geological Society of America, 1994. 1068 p.
48. *Yamamoto M., Polyak L.* Changes in terrestrial organic matter input to the Mendelev Ridge, western Arctic Ocean, during the Late Quaternary // *Global and Planetary Change*. 2009. V. 68. № 1-2. P. 30-37.

MINERALOGICAL CHARACTERISTIC OF QUATERNARY SEDIMENTS (SAND FRACTION) FROM THE SOUTHERN EXTREMITY OF THE CHUKCHI PLATEAU, ARCTIC OCEAN

© 2019 O. N. Kolesnik^{1,*}, A. N. Kolesnik¹, E. G. Vologina², A. A. Maryash¹

¹ V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia

² Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

*e-mail: kolesnik_o@poi.dvo.ru

Received August 21, 2017

Revised version received June 04, 2018

After revision July 02, 2018

The data on mineralogical analysis of fine sand fractions in sediments accumulated in the southern part of the Chukchi Plateau during the Quaternary are presented. The associations and downcore distribution of the rock-forming and accessory minerals in relation to other characteristics are considered. The established climatically controlled mineralogical features, i.e. periodicity of warmings and coolings, can be used in solving a number of genetic problems, stratigraphic subdivision of sediments and paleoreconstructions.

Keywords: Arctic Ocean, Chukchi Plateau, Quaternary, bottom sediments, sand fraction, rock-forming minerals, accessory minerals, colour characteristic, lithostratigraphy, paleoreconstructions