

УДК 551.465

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ТИПИЗАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ КАРСКОГО МОРЯ

© 2017 г. В. Ю. Русаков, Т. Г. Кузьмина, М. А. Левитан,
Е. С. Горопченова, А. В. Жилкина

Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, Россия

e-mail: rusakov@geokhi.ru

Поступила в редакцию 20.05.2016 г.

После доработки 27.06.2016 г.

Карское море является частью Западно-Арктического шельфа Евразии. Процессы осадконакопления в этом мелководном море в значительной степени определяются твердым стоком двух великих сибирских рек: Енисеем и Обью, а также периодами гляциации, когда акватория моря (в течение четвертичного периода) неоднократно осушалась и покрывалась материковыми ледниками. Подъем уровня Мирового океана в результате голоценового потепления привел к существенному расширению акватории моря на юг и полной деградации ледового щита. В данной статье рассматривается геохимический состав поверхностного (0–2 см) слоя донных осадков моря, отражающий особенности пространственного распределения геохимических типов осадков в период максимально высокого стояния уровня моря. Выделяются хемотипы осадков на основе кластерного анализа по дисперсии 24-х химических элементов, и проводится критический анализ их взаимосвязи с литотипами. Представленный оригинальный материал был собран в рейсах на борту НИС “Борис Петров” в 2000, 2001, 2003 гг. и НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2015 г.

DOI: 10.7868/S0030157417010166

ВВЕДЕНИЕ

Типизация как осадочных пород, так и неконсолидированных морских осадков является основой для реконструкции условий седиментации. Основная цель типизации – выделение разных групп пород и осадков, объединенных общими геохимическими (хемотип), минералогическими (минеральный тип), гранулометрическими (литотип) и иными признаками, которые отражают разные геологические, климатические, гидрологические и геохимические условия их формирования [13, 20].

На сегодняшний день Карское море можно с уверенностью отнести к наиболее изученным морям [14, 25–27, 29, 30]. За более чем столетнюю историю исследований накоплен большой массив данных и опубликованы сотни научных статей и книг по различным направлениям: начиная от геотектоники моря и заканчивая экологическими исследованиями. В этой череде публикаций хочется выделить лишь несколько, наиболее полно относящихся к нашей работе. Так, результаты литолого-фациальных исследований моря обобщены в работе Гуревича [4], биогеохимических исследований – в работе Галимова с соавторами [1], комплексные исследования геохимической системы река–море – в работе Лисицына [15].

Большой объем работ по изучению седиментации, биологии и экологии моря был проведен в ряде совместных немецко-российских экспедиций учеными из ГЕОХИ и AWI (Институт Полярных и морских исследований им. Альфреда Вегенера, Бремерхафен) в рамках программы SIRRO (Siberian River Run-Off) [28], а также в ходе рейсов Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН на НИС “Академик Мстислав Келдыш” и “Профессор Штокман” [21]. Результаты наших исследований являются небольшим дополнительным вкладом в понимание современных условий седиментации. Наша статья отличается использованием широкого спектра геохимических данных, позволяющих на новом математико-статистическом уровне описать процессы формирования осадочных отложений континентальных окраин, формирующихся под влиянием множества факторов: речной сток, морские течения, биологическая активность, климат высоких широт.

В рамках статьи проводится геохимическая типизация донных осадков с использованием 24-х химических элементов. Отдельно описываются особенности химического состава выделенных кластеров (хемотип). Основное внимание уделено взаимосвязи гранулометрического и химического состава осадков (лито- и хемотип). Результаты типизации осадков отражают современ-

ные условия наиболее высокого стояния уровня моря. Авторы надеются, что данная статья будет полезна широкому кругу литологов, занимающихся реконструкциями условий формирования осадочных пород континентальных окраин.

Представленный в статье материал (рис. 1) был собран М.А. Левитаном в рейсах на НИС “Борис Петров” в 2000, 2001, 2003 гг. (станции ВР00..., ВР01..., ВР03...) [22] и В.Ю. Русаковым в рейсе НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2015 г. (станции 51... и 52...), и публикуется впервые.

МЕТОДЫ

Донные осадки в районе исследований отбирались с помощью дночерпателей типа “Океан” и бокс-корера. Глубина отбора поверхностных донных осадков составляла 2 см. В Лаборатории геохимии осадочных пород ГЕОХИ РАН влажный осадок подвергался обработке ультразвуком для диспергации, а затем – водно-механическому разделению на отдельные фракции ситовым методом и декантацией аналитиком Л.А. Задориной. Результаты гранулометрического анализа представлены в табл. 1. До и после разделения пробы изучались под микроскопом и биноклем В.Ю. Русаковым в целях оценки содержания отдельных компонент, а также визуального контроля качества водно-механического анализа.

Часть осадка, отобранная для анализа химического состава, предварительно высушивались в сушильном шкафу при температуре около 50°C, а затем растиралась вручную в агатовой ступке до однородного порошкообразного состояния. Химический состав изучался в Лаборатории анализа вещества (ГЕОХИ РАН) с помощью XRF (определено содержание следующих элементов: Si, Al, Ti, Fe, Mn, K, Ca, Mg, Na, P, Cr, S, V, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Ba, As, Pb + LOI, аналитик Т.Г. Кузьмина). Результаты анализов сведены в табл. 2.

Обработка данных химического анализа проводилась методами математической статистики Т.Г. Кузьминой с помощью программы “Statgraphics Plus”. Для нахождения нагрузок химических элементов на факторы, контролирующие вариации химического состава донных осадков, т.е. собственных значений и соответствующих им собственных векторов, использованы многомерные (по числу включенных в них химических элементов) корреляционные матрицы с применением варимаксного (varimax) вращения факторов. Кластерный анализ проводился на основе предварительного факторного анализа с использованием полученных факторных значений. Это позволило осуществить разделение многомерной выборки на относительно однородные группы (кластеры), отличающиеся друг от друга и нахо-

дящиеся не только в согласии с принятыми классификациями, но и указывающие на отношения между переменными [9]. В данной работе использован один из видов кластерного анализа – метод Уорда (Ward’s method), в котором в качестве целевой функции применяют внутригрупповую сумму квадратов отклонений, т.е. сумму квадратов расстояний между точкой (объектом) и средней величиной по кластеру, содержащему этот объект. При этом в качестве меры сходства (сродства) использовалось Евклидово расстояние (дистанция, измеряемая в условных единицах).

МАТЕРИАЛЫ

Литотипы донных осадков определялись исходя из их гранулометрического состава. Всего было определено 9 гранулометрических фракций (1 гравийная, 5 песчаных, 2 алевритовых и 1 пелитовая). На графике распределения фракций (рис. 2) выделено два литотипа осадков: пески с пиком во фракции 0.25–0.125 мм и крупные алевриты с пиком во фракции 0.063–0.01 мм. Исключение оставляет лишь один образец алеврито-песчанисто-гравийных осадков, отобранный на ст. 5234, расположенной напротив пролива Вилькицкого. Учитывая более тонкий состав осадков соседних станций (ст. 5232 – алевриты, ст. 5236 – пески), с уверенностью можно констатировать, что ст. 5234 расположена в зоне влияния сильного вдольберегового придонного течения (рис. 1). Следует отметить, что нет зависимости между глубиной моря и гранулометрическим составом осадков (на графиках не показано). Встречаются пески на наиболее глубоких станциях (ст. 5239, глубина 242 м) и наоборот, более тонкие пелитово-алееритовые осадки – на мелководных (ст. ВР00-14/4, глубина 19 м) (табл. 1). Последнее может объясняться локальным влиянием придонных течений, размывающих донные осадки. Исходя из их гранулометрического состава, наиболее сильные течения приурочены к бортам Восточно-Новоземельской впадины и проливам, соединяющим море с соседними водными бассейнами. Существенно пелитовые осадки с содержанием пелитовой фракции (<0.002 мм) более 75 мас. % в Карском море присутствуют лишь в наиболее глубоководной части Восточно-Новоземельской впадины, узкой полосой протянувшейся вдоль восточного побережья Новой Земли. Результаты картирования голоценовых отложений Карского моря, основанные на большом фактическом материале [4], показали, что в зонах молодых поднятий и высокой гидродинамической активности подобные отложения полностью отсутствуют. В.И. Гуревич [4] отмечает обширную область поднятия в центральной части моря севернее 74° с.ш. с мощностью голоценовых осадков порядка 0–0.1 м (на карте не показано).

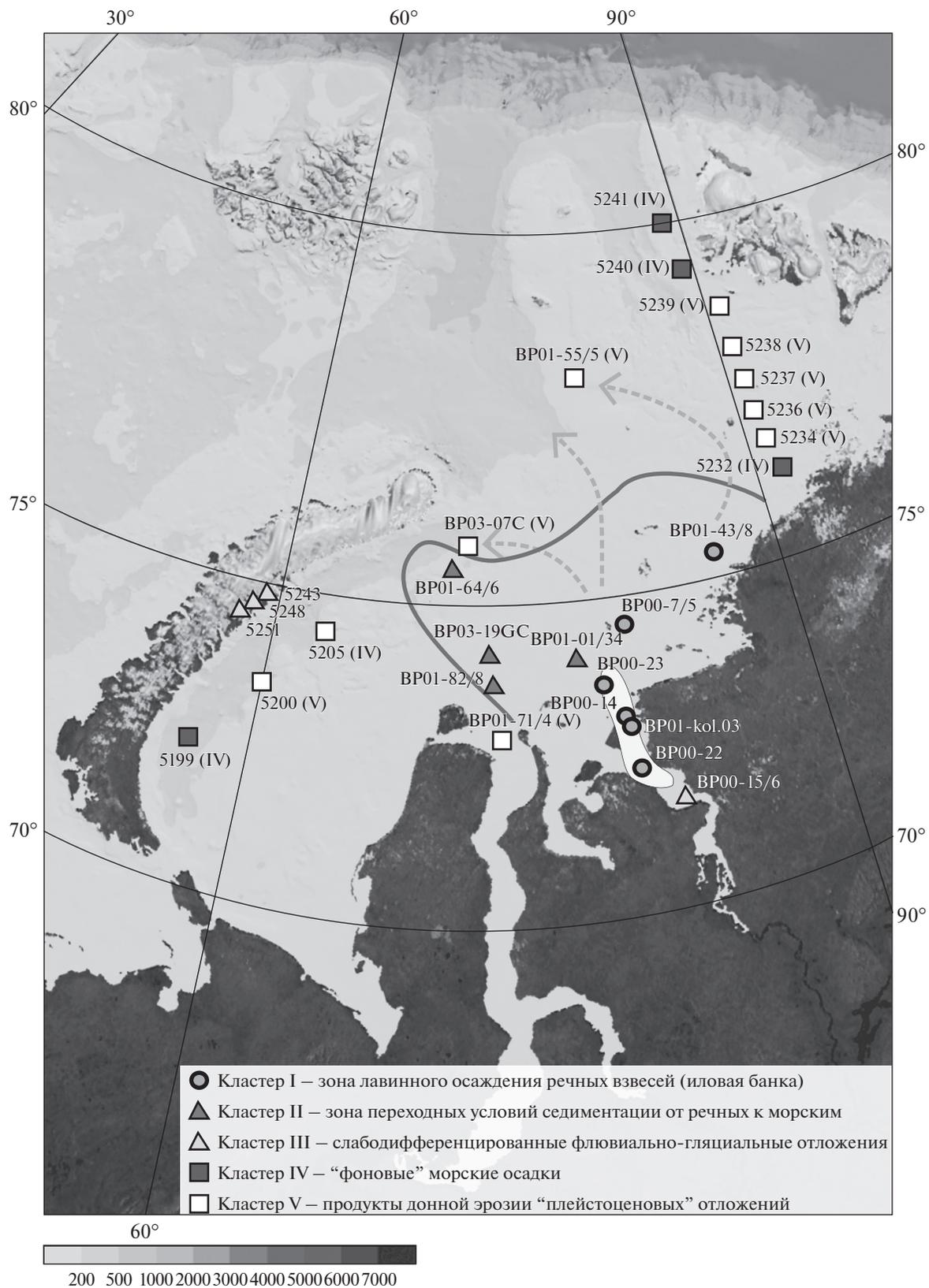


Рис. 1. Карта района исследований и расположение станций отбора проб донных осадков. Серым цветом обозначена область распространения иловых осадков повышенной влажности, линия показывает границу между зонами влияния речных взвесей и морскими осадками, стрелками показаны палеоруслу р. Енисей [30].

Таблица 1. Гранулометрический состав поверхностных (0–2 см) осадков Карского моря и соответствующие им кластеры

№ станции	Глубина, м	Гравий	Песок	Алеврит	Пелит	Гранулометрический тип		Кластер
BP00-7/5	38	0	0.95	83.77	15.28	Алеврит	ПА	I
BP00-14/4	19	0	1.31	73.34	25.35	Алеврит	ПА	I
BP00-43/8	48	0.27	1.77	69.57	28.39	Пелитовый алеврит	ПА	I
BP00-22	15	0.07	10.64	63.01	26.28	Пелитово-песчаный алеврит	ППсА	I
BP00-23	33	0	49.17	37.57	13.26	Пелитово-алевроитовый песок	ПАПс	I
BP00-23/7	33	0.07	11.57	61.66	26.7	Песчано-пелитовый алеврит	ПсПА	I
BP01-ko1.03	17	0	0.9	72.22	26.88	Алеврит	ПА	I
BP01-01/34	91	0	4.84	68.34	26.83	Пелитовый алеврит	ПА	II
BP01-64/6	99	0	4.74	65.97	29.29	Пелитовый алеврит	ПА	II
BP01-82/8	29	0	4.72	68.36	26.92	Пелитовый алеврит	ПА	II
BP03-19GC	34	2.06	5.95	65.41	26.58	Пелитовый алеврит	ПА	II
BP00-15/6	6	0	31.74	42.09	26.17	Пелитово-песчаный алеврит	ППсА	III
5243	200	0.74	36.75	52.6	9.91	Песчаный алеврит	ПсА	III
5248	130	0	0.34	86.45	13.21	Алеврит	ПА	III
5251	120	0.4	1.53	84.71	13.36	Алеврит	ПА	III
5199	330	0.13	5.04	72.81	22.02	Алеврит	ПА	IV
5205	190	0	14.21	67.89	17.9	Песчано-пелитовый алеврит	ПсПА	IV
5232	51	0	15.94	59.73	24.33	Песчано-пелитовый алеврит	ПсПА	IV
5240	290	0	6.22	74.31	19.47	Алеврит	ПА	IV
5241	330	0	3.51	75.07	21.42	Алеврит	ПА	IV
5200	205	0	57.74	31.08	11.18	Алевритовый песок	ПАПс	V
BP03-07C	108	0	27.46	52.05	20.49	Пелитово-песчаный алеврит	ППсА	V
BP01-55/5	83	0.38	23.65	50.48	25.49	Песчано-пелитовый алеврит	ПсПА	V
BP01-71/4	23	0	42.95	42.34	14.71	Алевритовый песок	ПАПс	V
5214	159	0.41	48.07	39.78	11.74	Алевритовый песок	ПАПс	V
5214_2	156	0	91.02	6.72	2.26	Песок	Пс	V
5234	47	46.75	29.06	17.69	6.5	Алевритово-песчаный гравий	АПсГ	V
5236	90	0	55.5	33.1	11.4	Пелитово-алевроитовый песок	ПАПс	V
5237	128	2.86	35.72	43.93	17.49	Песчаный алеврит	ППсА	V
5238	108	0	67.8	23.97	8.23	Алевритовый песок	АПс	V
5239	242	0	70.41	23.73	5.86	Алевритовый песок	АПс	V

Примечание. Тоном выделена доминирующая фракция.

Хемотипы (кластеры) донных осадков определялись на основе обработки данных химического состава проб по 24-м химическим элементам (табл. 2) с использованием кластерного анализа [18, 19]. Результаты математической обработки представлены в виде дендрограммы на рис. 3. В качестве границы выделения отдельных геохимических кластеров мы использовали Евклидово расстояние, выраженное на дендрограмме в виде дистанции в условных единицах (усл.ед.). В кластер I объединились образцы, отобранные на выходе из Енисейского залива, а их пространственное положение частично совпало с положением

иловых осадков, отличающихся повышенной влажностью > 70% (рис. 1). Согласно данным Лисицына [15], иловые осадки накопились в результате лавинного осаждения речной взвеси, выносимой Енисеем.

В кластер II объединились образцы, располагающиеся на границе между иловыми осадками кластера I и более глубоководными частями моря.

В кластер III мы объединили образцы, относящиеся к двум разным группам по степени родства и занимающие промежуточное положение между кластером II и IV. К первой группе отно-

Таблица 2. Химический состав поверхностных (0–2 см) донных осадков Карского моря, данные XRF анализа (мас. %)

№ станции	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Cr	S	V	Co	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	γ	Nb	Pb	Zr	Ba	LOI
BP00-7/5	49.22	14.96	0.713	9.77	0.354	2	1.18	2.9	4.19	0.246	0.0084	0.12	0.0219	0.0027	0.007	0.0031	0.0085	0.0077	0.0151	0.0025	0.0013	0.0021	103	399	14.04
BP00-14/4	52.15	15	0.815	9.36	0.094	2.14	1.6	3.19	3.08	0.213	0.0107	0.08	0.0189	0.0034	0.0071	0.0042	0.0093	0.0076	0.0174	0.0027	0.0012	0.0017	100	369	12.02
BP00-15/6	58.81	14.07	0.998	7.71	0.116	1.77	4.2	2.98	3.05	0.251	0.0122	0.06	0.0156	0.0027	0.006	0.0027	0.0079	0.0049	0.0399	0.0025	0.0012	0.0016	121	364	5.71
BP00-22	54.19	15.12	0.842	8.29	0.121	1.98	1.96	3.2	3.07	0.193	0.0124	0.1	0.0189	0.003	0.007	0.004	0.0094	0.0066	0.021	0.0027	0.0012	0.0019	120	349	10.68
BP00-23	54.22	15.12	0.762	8.37	0.093	2.14	1.56	3.01	3.2	0.149	0.0104	0.14	0.0224	0.0027	0.0067	0.0036	0.0085	0.0069	0.0165	0.0026	0.0011	0.002	116	372	10.95
BP00-23/7	55.79	14.74	0.77	8.28	0.086	2.18	1.55	2.89	3.02	0.143	0.0098	0.12	0.0216	0.0022	0.0065	0.0035	0.0084	0.0073	0.0177	0.0027	0.0011	0.0013	125	392	10.14
BP01-01/34	56.86	16.87	0.844	6.63	0.075	2.35	1.28	2.66	2.85	0.128	0.0103	0.18	0.0158	0.0026	0.0051	0.003	0.0084	0.0086	0.0196	0.0027	0.0013	0.0026	121	363	9.01
BP01-43/8	49.7	15.71	0.773	9.4	0.687	2.32	1.5	3.08	3.7	0.184	0.0079	0.19	0.028	0.002	0.0073	0.0035	0.009	0.0077	0.016	0.0025	0.0013	0.0021	116	376	12.48
BP01-55/5	62.46	13.36	0.647	5.52	0.078	2.3	1.2	2.29	3.02	0.14	0.0093	0.96	0.0233	0.0021	0.0041	0.0007	0.006	0.008	0.0201	0.0023	0.0013	0.0026	109	352	7.74
BP01-64/6	57.03	15.13	0.733	7.27	0.076	2.44	0.88	2.51	3.27	0.116	0.01	0.14	0.0276	0.0017	0.0052	0.0023	0.0084	0.0087	0.0145	0.0026	0.0013	0.0023	118	390	10.15
BP01-71/4	67.68	12.03	0.683	5.17	0.079	2.32	1.1	1.8	2.78	0.158	0.012	0.14	0.0133	0.002	0.0038	0.0009	0.0074	0.0069	0.0202	0.0022	0.0014	0.0016	112	378	5.81
BP01-82/8	56.41	13.91	0.719	8.33	0.108	2.22	0.97	2.34	3.42	0.205	0.0098	0.2	0.0199	0.002	0.0052	0.0021	0.0143	0.0077	0.0158	0.0025	0.001	0.0019	133	391	10.85
BP01-kol.03	51.99	14.97	0.831	8.99	0.108	1.88	1.99	3.12	3.3	0.209	0.0098	0.1	0.0195	0.0031	0.0067	0.0045	0.0091	0.0069	0.0208	0.0025	0.0011	0.0019	121	390	12.19
BP03-19GC	56.21	14.04	0.725	7.95	0.099	2.24	0.93	2.39	3.16	0.145	0.0107	0.19	0.0235	0.002	0.0048	0.0023	0.008	0.0084	0.0154	0.0027	0.0014	0.002	118	387	11.61
BP03-07C	63.91	13.66	0.686	5.56	0.076	2.44	0.96	2.11	2.95	0.119	0.0094	0.11	0.0201	0.0019	0.0041	0.0013	0.0066	0.0085	0.0171	0.0025	0.0011	0.0016	119	385	7.14
5199	50.92	13.12	0.68	6.53	3.35	2.08	0.98	2.84	3.62	0.41	<0.0001	0.228	0.0355	0.0023	0.0069	0.0023	0.0101	0.0102	0.0226	0.003	0.0016	0.0014	153	56	12.09
5200	60.63	13.08	0.583	5.85	1.58	2.48	1.24	1.65	3.99	0.272	0.0044	0.222	0.0202	0.0026	0.0054	0.0007	0.0064	0.0073	0.0216	0.0022	0.0013	0.0008	193	58	8.28
5205	47.53	15.36	0.737	10.24	1.7	2.57	1.06	2.26	4.19	0.346	0.0004	0.213	0.0356	0.0026	0.0079	0.0025	0.0099	0.0086	0.0212	0.0028	0.0011	0.0009	149	48	12.38
5214	62.91	14.71	0.648	6.05	0.171	2.64	0.91	1.95	2.81	0.241	0.0085	0.112	0.0209	0.002	0.0039	0.0008	0.007	0.0093	0.0159	0.0026	0.0015	0.0009	203	92	6.66
5232	54.45	15.41	0.764	8	1.074	2.39	1.41	2.26	3.74	0.261	0.0056	0.151	0.0217	0.0027	0.0062	0.0025	0.008	0.008	0.0228	0.0024	0.0012	0.0004	181	51	9.95
5234	62.08	12.99	0.53	5.97	0.696	2.18	1.03	1.71	3.46	0.209	0.0043	0.29	0.0177	0.0022	0.0045	0.0014	0.0056	0.0067	0.0745	0.002	0.0012	0.001	275	1160	7.54
5236	64.61	12.55	0.625	5.82	0.283	2.41	1.19	1.55	3.57	0.26	0.0058	0.154	0.0184	0.0019	0.0037	0.0011	0.0056	0.0076	0.0237	0.0021	0.0014	0.0007	242	64	6.82
5237	60.05	13.8	0.679	7.17	0.424	2.44	1.19	1.89	3.53	0.298	0.0079	0.138	0.0227	0.0023	0.005	0.0014	0.0068	0.0083	0.0249	0.0022	0.0014	0.0014	199	63	8.22
5238	67.9	12.19	0.561	4.86	0.43	2.53	1.19	1.34	3.32	0.22	0.0062	0.119	0.0174	0.002	0.0038	0.001	0.0053	0.0078	0.0264	0.0021	0.0011	0.0015	217	71	5.17
5239	65.9	12.6	0.562	5.51	0.579	2.58	0.99	1.41	3.44	0.229	0.014	0.139	0.0194	0.0012	0.0061	0.0011	0.0057	0.0078	0.0278	0.002	0.0012	0.0017	183	84	5.87
5240	47.06	16.78	0.756	9.82	1.4	2.54	0.89	2.41	3.96	0.302	0.0034	0.198	0.0373	0.0031	0.009	0.0027	0.0095	0.0092	0.0188	0.0026	0.0012	0.0007	130	52	13.34
5241	52.44	16.51	0.813	8.36	0.892	2.51	0.84	2.27	3.25	0.31	0.0074	0.165	0.0333	0.0029	0.0077	0.0016	0.0094	0.0089	0.0167	0.0027	0.0014	0.0009	156	58	11.46
5248	55.17	17.37	0.83	7.59	0.17	2.62	2.51	2.71	2.41	0.176	0.012	0.057	0.024	0.0027	0.0085	0.0037	0.0117	0.0091	0.0114	0.0028	0.0015	0.0005	152	75	8.21
5251	52.55	18.05	0.828	7.35	0.494	2.91	2.61	2.97	2.22	0.187	0.0117	0.064	0.0283	0.0028	0.0086	0.0034	0.0126	0.0105	0.0127	0.0029	0.0013	0.001	148	78	9.59
5243	54.72	18.1	0.83	8.03	1.36	2.86	0.75	2.48	3.2	0.23	0.0042	0.082	0.0247	0.0025	0.0075	0.0036	0.011	0.0101	0.0091	0.0029	0.0012	0.0008	159	660	7.47

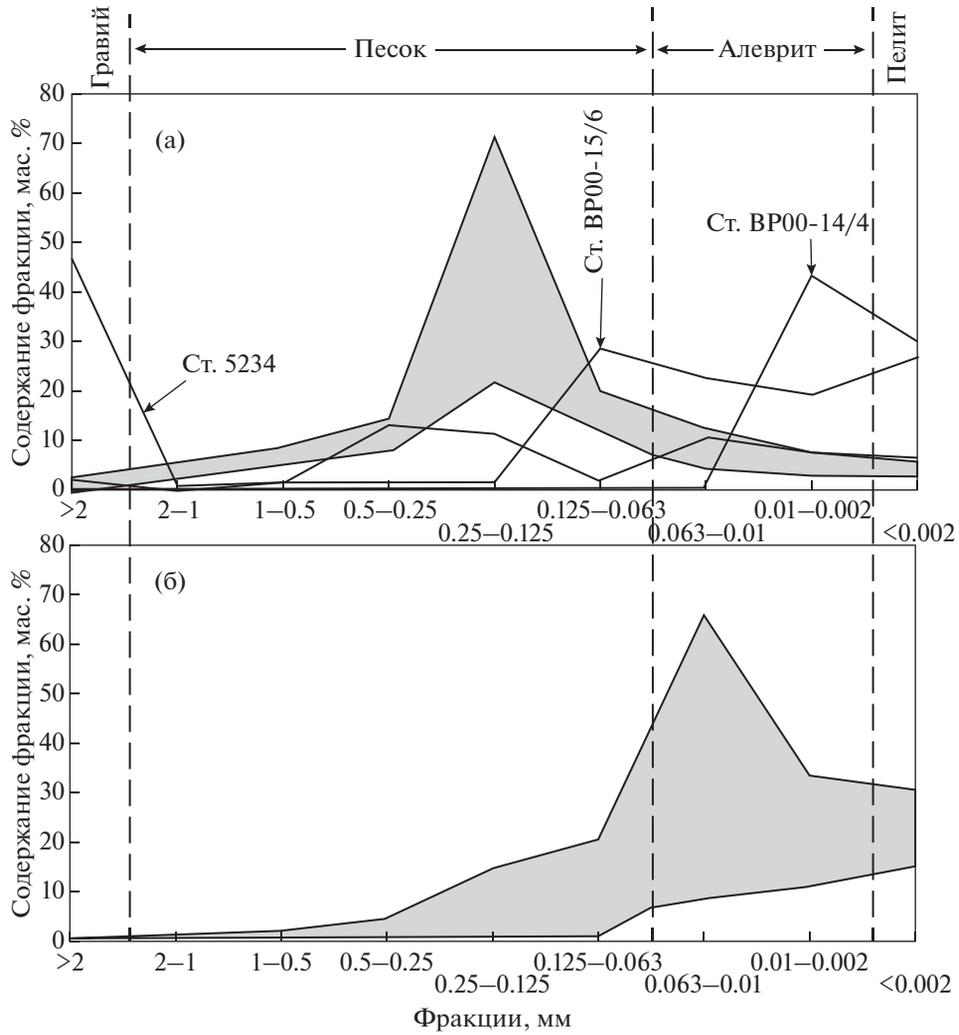


Рис. 2. Распределение весовых содержаний гранулометрических фракций донных осадков Карского моря: (а) – пески, (б) – алевриты. Линиями показаны распределения содержания фракций для отдельных станций. Подробное описание гранулометрического состава по станциям см. в табл. 1.

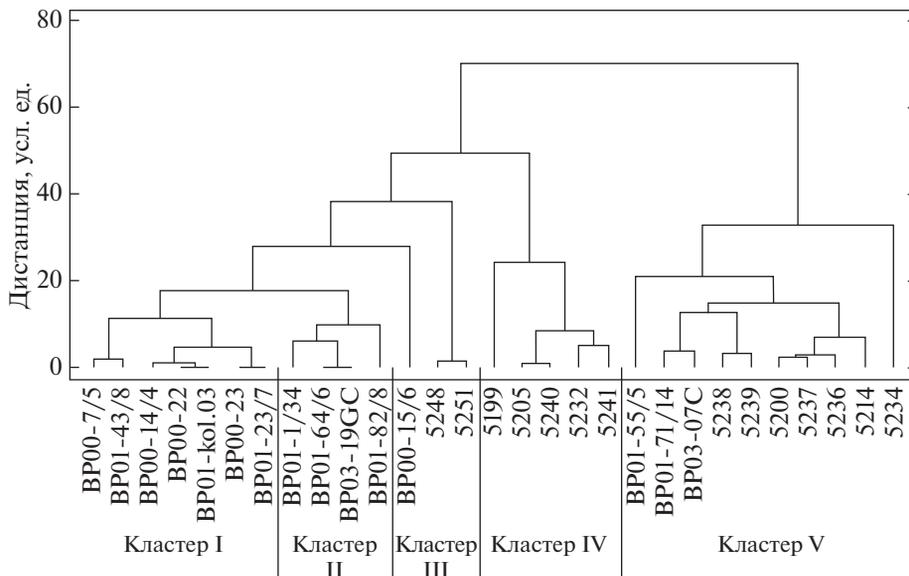


Рис. 3. Дендрограмма кластерного анализа химического состава донных осадков Карского моря.

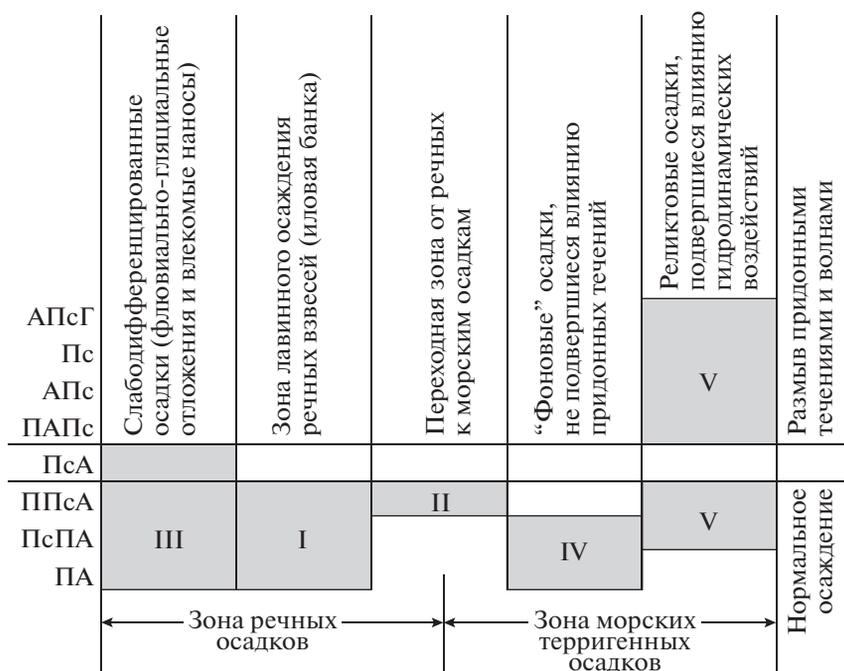


Рис. 4. Соотношение между гранулометрическим составом (см. табл. 1) и геохимическими кластерами (см. рис. 3). Подробное описание см. в тексте.

сится образец, отобранный на ст. ВР00-15/6, расположенной в южной части Енисейского залива. По степени сродства он ближе к кластерам I и II и, с литологической точки зрения, является частью речных осадков. Ко второй группе относятся осадки, отобранные в заливах Новой Земли (станции 5243 (на рис. 3 не показана), 5248 и 5251). Между последними тремя станциями очень высокая степень сродства и на графике им соответствует минимальная дистанция. Это объясняется тем, что заливы расположены близко друг к другу, а их донные осадки имеют общий источник осадочного материала (продукты выноса ледников Новой Земли).

В кластер IV объединены осадки, по степени сродства сильно отличающиеся от предыдущих кластеров (около 50 усл.ед.), однако, исходя из иерархических связей между выделенными кластерами, можно утверждать, что генетически они ближе к кластерам I, II и III, чем к кластеру V. Осадки этого кластера расположены в глубоководных частях моря и занимают обширную территорию.

Отдельную группу образуют осадки, объединенные в кластер V. Их степень сродства с предыдущими кластерами минимальна (>60 усл. ед.). Как осадки кластера IV, они занимают обширный район, распространяясь практически на большую часть моря. На карте моря (рис. 1) осадки кластеров IV и V показаны одним значком (квадратом). Это сделано для того, чтобы не вносить путаницу

в восприятие данных, поскольку выделение четких границ между этими кластерами сильно затруднено в силу малой плотности опробования.

Две самостоятельные группы осадков со своими иерархическими связями (рис. 3), можно объяснить двумя разными источниками осадочного вещества. Для осадков кластеров I, II, III – речной сток, для осадков кластера V – “древние” (плейстоценовые) осадочные образования морского дна. Принимая во внимание более грубый гранулометрический состав осадков кластера V, по сравнению с осадками других кластеров, можно предположить, что источником последних стали продукты механического разрушения осадочных пород дна моря придонными течениями и волнами.

Соотношение между лито- и хемотипами. На рис. 4 показано соотношение между гранулометрическим составом осадков и кластерами, выделенными на основе статистической обработки данных химического состава. При этом кластеры расположены в порядке удаления от устья реки в глубоководную часть моря (слева направо). Из этого рисунка видно, что кластеры III и I образуют последовательность осаждения речных взвешенных и влекомых частиц от более крупных алевритов (ПсА) в Енисейском заливе к более тонким алевритам (ПА), формирующим иловую банку на выходе из залива (рис. 1). Переход к морским осадкам связан с некоторым укрупнением

Таблица 3. Лито- и хемотипы (кластеры), макро- и микроэлементы, характеризующие хемотип, содержание макроэлементов (мас. %) и условия отложения поверхностных донных осадков Карского моря

Литотип*	Кластер	Хим. элементы		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Условия отложения
		макро	микро				
ПА-ППсА	I	Fe-Al-Si	Ba	52.47	15.09	8.92	Лавинное осаждения речных взвесей (иловая банка)
ППсА	II	Al-Si	Ba	56.63	14.99	7.54	Переходные условия седиментации от речных к морским
ПА-ПсА	III	Al-Si(Al-Al-Si)**	Ca	55.51	16.50	7.55	Слабодифференцированные флювиально-гляциальные отложения
ПА-ПсПА	IV	Fe-Al-Si	Mn	48.57	16.39	9.10	“Фоновые” морские осадки
ПсПА-АПсГ	V	Al-Si	P	63.81	13.10	5.75	Продукт донной эрозии “доголоценовых” отложений

* Условные обозначения см. в табл. 1.

** Al-Si – флювиальные, Al-Al-Si – гляциальные.

их гранулометрического состава (ППсА) под влиянием придонных морских течений.

Морские осадки открытой части моря делятся на два кластера (IV и V), отражающих как гранулометрические, так и генетические различия. Как мы упоминали выше, более тонкие осадки кластера IV (ПсПА и ПА) по совокупности дисперсии своего геохимического состава (сродства) образуют генетическую связь с речными осадками (рис. 3). В то же время, слабое геохимическое сродство осадков кластера V может объясняться размывом верхнего слоя донных отложений придонными течениями и волнами, и эксгумацией более “древних” (доголоценовых) отложений на поверхность дна моря. Наше предположение подтверждается их аномально грубым гранулометрическим составом (от ПАПс до АПсГ). При этом, более тонкие фракции этого кластера (ППсА и ПсПА), очевидно, являются продуктами придонного переотложения “древних” осадочных пород. Иными словами, наблюдается механическая дифференциация осадочных отложений: на месте размыва образуются более грубые песчано-гравийные осадки, а продукты размыва осаждаются в более спокойных гидродинамических условиях, образуя алевритовые отложения. В любом случае, с геохимической точки зрения осадки кластера V имеют принципиально отличный источник осадочного вещества от всех изученных нами групп отложений. Исходя из совокупности приведенных выше данных, осадки кластера V являются аллювиальными доголоценовыми (возможно плейстоценовыми) осадками, характерными для обширной акватории южной части моря (около 70% площади моря), примыкающей к устьевым зонам [4].

Макро- и микроэлементы. Элементограмма химического состава изученных нами образцов

(рис. 5) свидетельствует о сравнительно однородном составе поверхностных осадков Карского моря. По своему химическому составу их можно отнести к алюмокремневым породам со средними значениями для SiO₂ = 52–63 мас. %, для Al₂O₃ = 13–16 мас. % и для Fe₂O₃ = 6–9 мас. % (табл. 3). В рамках статьи под термином “алюмокремневые породы” мы подразумеваем широкий спектр осадочных отложений, включая как голоценовые донные осадки, так и консолидированные осадочные породы, прошедшие постседиментационные стадии преобразования. Как видно из табл. 2, вариации макроэлементного состава изученных образцов достаточно невелики, колеблясь в пределах 10% от их общего содержания. Тем не менее, результаты математической обработки позволили нам выделить отдельные геохимические группы осадков, с характерными особенностями их макро- и микрохимического состава. Сводные результаты исследований макро- и микрохимического состава изученных образцов по отдельным геохимическим кластерам сведены в табл. 3.

Вариации наблюдаются для Si, Al и Fe (рис. 5а), образующих макроэлементный состав осадков. Также наблюдаются видимые отклонения в потерях при прокаливании (LOI – loss on ignition), однако интерпретация этого показателя затруднена в силу отсутствия данных по содержанию органического вещества и глинистым минералам, дающим основной вклад в LOI.

Si, Al, Fe. Ниже приводится описание макрохемотипов донных осадков в соответствии с уменьшением содержания в них кремния. Осадки кластера V характеризуются наиболее высокими содержаниями SiO₂ (>60 мас. %) и наиболее низкими содержаниями Al₂O₃ и Fe₂O₃ (~12–13) и

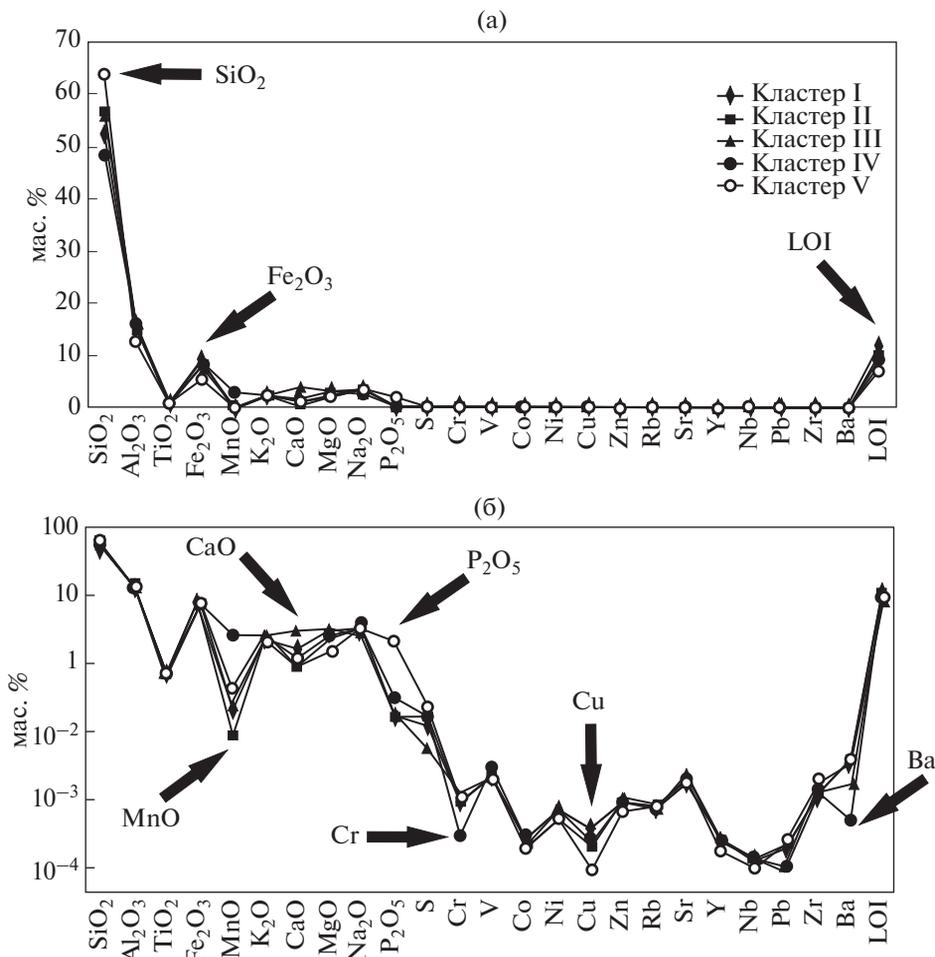


Рис. 5. Элементограмма содержаний химических элементов в донных осадках Карского моря: (а) – обычная шкала, (б) – шкала в лагорифмическом масштабе.

~(6–7) мас. %, соответственно) (табл. 2). На этом основании мы отнесем их к макро-хемотипу: Al-Si (табл. 3). Вторым по содержанию Si выступают осадки кластера II, со средним содержанием SiO₂ = 56.63 мас. %. Они также характеризуются сравнительно низкими содержаниями Al₂O₃ и Fe₂O₃ (14.99 и 7.54 мас. %, соответственно) и относятся к тому же макро-хемотипу: Al-Si. Третьим по содержанию Si (SiO₂ = 55.51 мас. %) являются осадки кластера III. Как мы отмечали выше, этот кластер объединяет слабодифференцированные, с геохимической точки зрения, осадки с аномально высоким содержанием Al₂O₃ (14–18 мас. %), т.е. осадки наиболее глинистые. Однако, когда речь идет о кластере III, необходимо помнить, что мы имеем дело с двумя разными объектами исследований. Ст. ВР00-15/6 расположена в устье Енисея и отражает речные влекомые наносы (14.07 мас. % Al₂O₃), а станции 5243, 5248 и 5251 расположены в заливах Новой Земли (17.37–18.10 мас. % Al₂O₃), отражая гляциальные условия

осадкообразования. В первом случае осадки подвергались влиянию речных течений и потеряли значительную часть глинистых минералов (Al-Si), а во втором случае, благодаря изолированности локальных депрессий внутри заливов от морских течений, осадки сохранили свою первоначальную глинистую составляющую (Al-Al-Si) (табл. 3). Четвертое место по содержанию Si занимают осадки кластера I (52.47 мас. % SiO₂), отличающиеся более высоким содержанием Fe (8.9 мас. % Fe₂O₃). Согласно последнему показателю мы отнесем эти образцы к Fe-Al-Si макро-хемотипу. Однако наиболее низким содержанием Si (48.57 мас. % SiO₂) и наиболее высоким содержанием Fe (9.1 мас. % Fe₂O₃) обладают осадки IV кластера, характеризующие геохимический состав “фоновых” (для Карского моря) морских осадков, сформированных по механизму “частица за частицей”. Они наиболее четко отражают гидродинамически спокойные условия осадконакопления в депрессиях моря.

Средние содержания **Ва, Са, Мп и Р** для разных кластеров наиболее наглядно можно проиллюстрировать на шкале в логарифмическом масштабе (рис. 5б). Наиболее значимые отклонения в элементном составе между кластерами показаны стрелками. Следует заметить, что на этом графике различия для микроэлементов на порядок выше, чем для макроэлементов. То есть, несмотря на низкие содержания Ва, Са, Мп и Р в осадках, они наиболее ярко выражают геохимические особенности разных кластеров. Так, осадки кластеров I и II характеризуются наиболее высокими содержаниями Ва и отражают его осаждение с речными взвесями. Слабодифференцированные флювиально-гляциальные осадки кластера III обладают наиболее высоким содержанием Са. При этом влекомые наносы Енисея (ст. ВР00-15/6) обладают наиболее высоким содержанием (4.2 мас. % Са), а осадки заливов Новой Земли характеризуются более низкими значениями (ст. 5248 – 2.51 мас. % Са, ст. 5251 – 2.61 мас. % Са). Несмотря на указанные различия, эти величины значительно превышают средние содержания Са для подавляющего числа изученных проб, которые находятся в диапазоне 1.0–1.5 мас. % (табл. 2). На этой основе осадки кластера III мы отнесли к одному Са-микро-хемотипу (табл. 3). Однако, наиболее яркие отличия в элементном составе образцов проявляются в аномально высоком содержании Мп для осадков кластера IV и Р для осадков кластера V. Первые (кластер IV) характеризуют “фоновые” морские осадки, для которых характерно биогенное осаждение Мп в составе морских тонких органоминеральных взвесей, а вторые (кластер V) отражают накопление более гранулометрически грубых частиц с большим удельным весом, возможно, также рудных минералов.

Аномально высокие содержания Мп в осадках кластера IV могли стать также следствием диагенетического обогащения верхнего слоя осадков за счет его восстановления. В любом случае это не меняет их генетическую принадлежность, химический и гранулометрический состав которых отражает состав голоценовых осадков моря, накопившихся в относительно гидродинамически спокойных условиях вследствие осаждения тонких взвесей.

По результатам изучения минералов тяжелой подфракции в составе алевритовой фракции на Западно-Арктическом шельфе выделяют эпидотпироксен-чернорудно-роговообманковую ассоциацию Карского типа, в которой также присутствует апатит [4]. Также для осадков кластера IV наблюдается аномально низкое содержание Сг, а для осадков кластера V – Си. В отсутствии данных по минеральному составу изученных образцов объяснить эти особенности пока не представляется возможным.

ОБСУЖДЕНИЕ

Е.М. Емельянов [10] относит геохимический барьер река–море к гидродинамическим или механическим барьерам, подчеркивая, тем самым, доминирующее влияние течений и волн при формировании литолого-геохимического состава осадочных отложений. С этих позиций изученные донные осадки условно можно разделить на две пространственные зоны (речные и морские осадки) (рис. 4), в каждой из которых действуют разные по природе и интенсивности гидродинамические факторы.

Речные осадки (флювиально-гляциальные осадки кластеров I и III). На первом этапе при резком снижении скорости водных потоков происходит накопление слабодифференцированных осадков [2, 17, 23, 24]. В случае с заливами Новой Земли (станции 5243, 5248 и 5251) это сброс талой воды в результате таяния ледников архипелага. Поскольку заливы имеют внутреннюю котловину, отделяющую ее баром от влияния морских течений, то осадочный материал ледников накапливается преимущественно внутри заливов, не подвергаясь гранулометрической дифференциации морскими течениями и волнами. В случае со сток р. Енисей (ст. ВР00-15/6) это накопление влекомых рекой наносов (или влекомых наносов). Как правило, по гранулометрическому составу последние сложно отделить от речных взвесей, они представляют собой механическую смесь частиц, перенесенных потоками реки вдоль дна с места их образования и непосредственного разрушения горных пород в устьевую область. К слабодифференцированным отложениям мы их относим, прежде всего, потому, что на этой стадии накапливаются осадки, отражающие широкий спектр пород водосборного бассейна. Иными словами, осадочный материал этой стадии еще не прошел дифференциацию геохимической барьерной зоны река–море. Разнообразный минеральный состав таких отложений, в конечном счете, и определяет высокую дисперсность их химического состава. Следует заметить, что устьевая область реки наиболее динамически активна и сильнее других подвержена влиянию сезонных паводков [2, 17]. А.П. Лисицын [15] называет эту зону гравитационной частью маргинального фильтра, поскольку накопление осадков здесь происходит вследствие гравитационного осаждения частиц. Внутри этой части маргинального фильтра он выделяет первую стадию – накопление крупнозернистых осадков размером >0.01 мм, и вторую стадию – накопление тонкозернистых осадков < 0.01 мм. Отсутствие песчаных проб в нашей коллекции указывает на то, что судно не заходило высоко в устье Енисея, и мы отобрали осадки только на внешней границе крупнозернистой стадии внутри эстуария. Наши

данные показали, что, несмотря на различия в происхождении этих осадков, по совокупности химического состава их можно объединить в одну группу (кластер III – флювиально-гляциальные осадки), характеризующую геохимически слабо-дифференцированные континентальные отложения.

Ниже по течению реки там, где скорости водных потоков постепенно выравниваются со скоростями морских течений, происходит основная садка тонкозернистых частиц, выносимых речным стоком. Часто в литературе эти отложения именуют иловой банкой. На этой стадии (стадия 2) формируются воды с повышенной мутностью, концентрация которой оказывается выше, чем до нее и после нее [3]. На дно осаждаются более тонкие частицы размером <0.002 мм (пелитовая фракция). Поскольку пелитовые частицы не способны под влиянием сил гравитации самостоятельно осесть на дно в силу горизонтальных течений и турбулентности воды, их осаждению способствуют процессы коагуляции. Отрицательно заряженные глинистые частицы, попадая в электролит морской воды, вступают во взаимодействие с органическим веществом. В результате образуются сложные комплексы органоминеральных соединений в виде хлопьев, способных под действием сил гравитации осаждаться на дно. По результатам изучения радиоизотопов в осадках Карского моря было показано, что в этой зоне активно осаждаются также ^{137}Cs [1] (рис. 1).

По схожему механизму, видимо, образуются органоминеральные соединения в почвах. Г.А. Заварзин [11] пишет, что во взаимодействии с отрицательно заряженными минералами участвуют аминокислоты, образующие ионную связь, металл-органические комплексы многовалентных металлов, таких как Fe, образующие мостик между отрицательно заряженной поверхностью глинистого минерала и карбоксильной группой гуминовой кислоты. Органические соединения на поверхности глин защищены как от химического, так и биологического окисления.

Наши данные показали высокое содержание Fe для осадков кластера I (табл. 3, рис. 5), отражающего состав осадков иловой банки. Здесь следует отметить, что в осаждении речных взвесей активную роль играет растворенная органика, взаимодействующая как с тонкими частицами глинистых минералов, так и металлами (прежде всего, железом).

А.П. Лисицын [15] отмечает, что на этом этапе (стадия 2) высокая мутность вод препятствует развитию фитопланктона, несмотря даже на высокие концентрации биогенов. Однако можно полагать, что это не единственный фактор препятствующий развитию фитопланктона. Как мы упоминали выше, органоминеральные соедине-

ния защищают органическое вещество от окисления, в том числе и от его ассимиляции морскими микроорганизмами. В любом случае эта стадия характеризуется подавленностью биотических процессов.

Результаты математической обработки данных по химическому составу осадков этой зоны показали, что они обладают высоким средством и объединяются под общим кластером I, характеризующим лавинное осаждение речных взвесей (рис. 1).

Переходная зона (кластер II). По своему гранулометрическому составу эти осадки несколько более грубые, чем осадки кластеров I и III (табл. 1, рис. 4). Их пространственное положение полностью локализовано в области поднятия, отражающего наиболее гидродинамически активную область моря и минимальные мощности голоценовых осадков. С геохимической точки зрения, осадки этого кластера являются переходными между кластерами I и IV, а их наиболее яркой отличительной особенностью является аномально низкое содержание Mn, выпадающего в осадок в виде тонких взвесей в результате микробной деятельности в мористой части эстуарной зоны Оби и Енисея севернее $73^{\circ}30'$ с.ш. [16].

Морские осадки (кластер IV). С точки зрения строения геохимической барьерной зоны река-море [10] и маргинального фильтра [15] третья стадия осадконакопления (зона формирования коллоидов) наиболее важна, т.к. на ней происходит осаждение подавляющего количества выносимых рекой растворенных химических элементов и формирование коллоидных частиц (рис. 1). Эта стадия принципиально отличается от двух предыдущих тем, что частицы, осаждающиеся на ней, не приносятся речными водами, а образуются непосредственно в этой зоне (*in situ*). А.П. Лисицын [15] также называет эту часть фильтра физико-химической частью или коллоидным насосом. В диапазоне солености от 3 до 20‰ активно развиваются процессы коагуляции, флокуляции и адсорбции. В отличие от флокуляции (преобразования органических и неорганических растворенных и коллоидных веществ во взвешенные аморфные частицы [3]), адсорбция – это способность частиц захватывать ионы из раствора на свою поверхность. Эти процессы протекают с активным участием растворенной органики и металлов. В результате в водной среде образуются флокулы гидроксидов Fe, Mn и Al, которые адсорбируют на своей поверхности широкий спектр растворенных химических элементов. Источником этих элементов наравне с речной водой также являются морские растворы.

Частицы взвеси в эстуариях Оби и Енисея были детально изучены первым автором данной статьи в 28-м рейсе НИС “Академик Борис Петров” [16]. Результаты показали, что в зоне

смешения речных и морских вод в диапазоне солености от 2 до 10 ‰ происходит коагуляция коллоидов комплексных соединений Fe, Al, Mn, Ti, органического вещества и глинистых минералов. В течение этого процесса образуется новое по составу взвешенное вещество, отличающееся от речных взвесей. Совокупность геохимических данных позволяет утверждать, что осадки кластера IV являются результатом осаждения именно таких взвесей, обладающих повышенным содержанием Fe, Al и Mn (табл. 3, рис. 5). Благодаря своему тонкому составу, эти взвеси скапливаются в наиболее гидродинамически спокойных условиях локальных котловин и отражают крайнюю степень адаптации речных вод к морским условиям. Основываясь на этих фактах, мы охарактеризовали осадки кластера IV как “фоновые” морские осадки, отражающие условия современной седиментации открытых областей Карского моря (рис. 4). В контексте данной статьи под “фоновыми” морскими осадками мы подразумеваем одну из разновидностей терригенных осадков Карского моря. Как мы упоминали выше, повышенные содержания Mn в осадках данного хемотипа (кластера) могут отражать не только повышенную седиментационную поставку этого элемента, но и его постседиментационное диагенетическое восстановление из осадков с последующей концентрацией в верхних горизонтах осадочного разреза.

Морские осадки кластера V по совокупности литологических и геохимических данных отражают процессы донной эрозии доголоценовых аллювиальных осадочных отложений. Согласно гранулометрическому составу осадки кластера V разделяются на две группы, отражающие разные гидродинамические условия их формирования. К первой группе принадлежат более тонкие алевритовые осадки (ПсПА и ППсА – зона нормального осаждения) (табл. 1, рис. 4). Согласно нашим данным, они сформировались как продукт придонного переноса осадочного материала из мест размыва плейстоценовой осадочной толщи придонными течениями и/или волнами в зону их накопления. Следует отметить, что по геохимическим признакам они не теряют связь с “материнскими” отложениями, сохраняя свою принадлежность к кластеру V. Ко второй группе принадлежат осадки морского дна, подвергшиеся частичной эрозии придонными течениями и/или волнами. В отличие от первой группы они сохранили свое первоначальное положение и выступают в качестве их “материнских” отложений. Осадки второй группы полностью сложены песками и гравием (табл. 1, рис. 4). Наше предположение основано не только на собственном материале, собранном и обобщенном Кленовой [12], Дибнером [6–8], а также Гуревичем и Хасанкаевым [5]. Согласно их мнению, основная часть

донного каменного материала Карского моря своим происхождением обязана процессам донной абразии. По данным Гуревича [4], в 67% современных отложений шельфа Карского моря встречаются фрагменты фанерозойских метаморфических (кварциты, амфиболиты, кристаллические сланцы, гнейсы и др.) и позднекайнозойских осадочных (алеюриты, глины и др.) горных пород.

ВЫВОДЫ

Статистическая обработка данных химического состава на основе 24-х химических элементов поверхностного слоя донных осадков Карского моря с помощью кластерного анализа позволила разделить осадки на 5 отдельных кластеров, каждый из которых характеризуется разным содержанием макро- и микроэлементов. Сопоставление выделенных кластеров с соответствующими им литотипами, позволило выделить две большие генетические группы осадков (согласно источнику их поступления): речные (влекомые наносы, взвеси, растворы) и локальные. Пространственная дифференциация речных отложений контролируется гидродинамическими и геохимическими процессами, происходящими на разных стадиях осаждения вещества речного стока внутри геохимической барьерной зоны река–море. Пространственное распределение локальных осадков контролируется батиметрическим положением морского дна и гидродинамическим режимом волн и придонных течений. Источником локальных осадков является подводная эрозия аллювиальных доголоценовых (возможно плейстоценовых) отложений.

Экспедиционные исследования поддержаны РФФИ (проект № 14-05-05003Кар_a).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галимов Э.М., Кодина Л.А., Степанец О.В., Коробейник Г.С. Биогеохимия Российской Арктики. Карское море. Результаты исследований по проекту SIRRO 1995–2003 годы // Геохимия. 2006. № 11. С. 1139–1191
2. Гордеев В.В. Реки Российской Арктики: потоки осадочного материала с континента в океан / Новые идеи в океанологии Т. 2. Геология. М.: Наука, 2004. С. 113–167.
3. Гордеев В.В. Геохимия системы река–море. М.: И.П. Матушкина И.И., 2012. 452 с.
4. Гуревич В.И. Современный седиментогенез и геоэкология Западно-Арктического шельфа Евразии. М.: Научный мир, 2002. 135 с.
5. Гуревич В.И., Хасанкаев В.Б. К теории распространения донного каменного материала в морских осадках и о методах изучения ДКМ // Географические аспекты осадконакопления в бассейнах Ба-

- ренцева и Белого морей. Л.: Сев. филиал Географ. общ., 1974. С. 70–91.
6. Дибнер В.Д. “Древние” глины и рельеф Баренцево-Карского шельфа – прямые доказательства его покровного оледенения в плейстоцене // Проблемы полярной географии. Л.: НИИГА, 1968. С. 118–121.
 7. Дибнер В.Д. Неиспользованные возможности изучения донного каменного материала // Шельфы, состояние проблемы и перспективы изучения. Л.: НИИГА, 1969. С. 32–35.
 8. Дибнер В.Д. Морфоструктура шельфа Баренцева моря // Тр. НИИГА, Т. 185. Л.: Недра, 1978. 212 с.
 9. Дэвис Дж.С. Статистический анализ в геологии. М.: Недра, 1990. 319 с.
 10. Емельянов Е.М. Барьерные зоны в океане: Осадко- и рудообразование, геоэкология. Калининград: Янтар. сказ, 1998. 416 с.
 11. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии / Ред. Колотилова Н.Н. Ин-т микробиологии. М.: Наука, 2003. 348 с.
 12. Кленова М.В. Геология Баренцева моря. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 367 с.
 13. Кузнецов В.Г. Литология. Основы общей (теоретической) литологии. Учебное пособие для вузов. М.: Научный мир, 2011. 360 с.
 14. Левитан М.А., Буртман М.В., Демина Л.Л. и др. История голоценовой седиментации в южной части Карского моря // Литол. и полезн. ископаемые. 2004. № 6. С. 651–666.
 15. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
 16. Лукашин В.Н., Люцарев С.В., Краснюк А.Д. и др. Взвешенное вещество в эстуариях Оби и Енисея (по материалам 28 рейса НИС “Академик Борис Петров”) // Геохимия. 2000. № 12. С. 1329–1345.
 17. Михайлов В.Н. Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 413 с.
 18. Русаков В.Ю., Кузьмина Т.Г., Рощина И.А. Использование статистических методов для изучения химического состава океанических осадков (на примере глубоководных верхнеплейстоцен-голоценовых осадков хребта Гаккеля). Ч. II // Геохимия. 2012. № 9. С. 848–859.
 19. Русаков В.Ю., Левитан М.А., Кузьмина Т.Г. и др. Типизация поверхностного слоя донных осадков Карского моря на основе кластерного анализа // Геология морей и океанов: Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ГЕОС, 2015. С. 305–309.
 20. Фролов В.Т. Литология. Кн. 1. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с.
 21. Экосистема Карского моря: от эстуариев Оби и Енисея до желоба Святой Анны (под ред. Флинта М.В.) // Океанология (специальный выпуск). 2015. № 4. С. 501–726.
 22. Berichte zur Polar- und Meeresforschung (Reports on Polar and Marine Research). 2001. V. 393. 287 p.; 2002. V. 419. 278 p.; 2003. V. 450. 109 p.
 23. Gordeev V.V., Martin J.-M., Sidorov I.S., Sidorova M.V. A reassessment of the Eurasian river input of water, sediment, major ions and nutrients into the Arctic Ocean // Amer. J. Sci. 1996. V. 296. P. 664–691.
 24. Milliman J.D. Flux and fate of fluvial sediment and water in coastal seas // Ocean Margin Processes in Global Change / Eds. Mantoura R.F.C. et al. Press: Chichester et al., John Wiley & Sons. 1991. P. 69–90.
 25. Polyak L., Levitan M., Gataullin V. et al. The impact of glaciation, river-discharge and sea-level change on Late Quaternary environments in the south-west Kara Sea // Int. J. Earth Sci. 2000. V. 89. P. 550–562.
 26. Polyak L., Levitan M., Khusid T. et al. Variations in the influence of riverine discharge on the Kara Sea during the last deglaciation and the Holocene // Global Planet. Change. 2002. V. 32. P. 291–309.
 27. Polyak L., Forman S.L., Herlihy F.A. et al. Late Weichselian deglacial history of the Svytaya (Saint) Anna Trough, northern Kara Sea, Arctic Russia // Mar. Geol. 1997. V. 143. P. 169–187.
 28. Siberian river run-off in the Kara Sea. Characterisation, quantification, variability and environmental significance / Eds. Stein R et al. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2003. 488 p.
 29. Stein R., Dittmers K., Niessen F., Fahl K. Siberian river run-off and Late Quaternary glaciation in the southern Kara Sea, Arctic Ocean: Preliminary results // Polar Res. 2002. V. 21. P. 315–322.
 30. Stein R., Fahl K., Dittmers K. et al. Holocene siliciclastic and organic carbon fluxes in Ob and Yenisei estuaries and the adjacent inner Kara Sea: Quantification, variability, and paleoenvironmental implication // Siberian river run-off in the Kara Sea Characterisation, quantification, variability and environmental significance / Eds. Stein R. et al. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 2003. P. 401–428.

Lithology and Geochemistry Typification of Surface Sea-Bottom Sediment at the Kara Sea

V. Yu. Rusakov, T. G. Kuzhmina, M. A. Levitan, E. S. Toropchenova, A. V. Zhyllkina

In this article new data on geochemical composition of surface (0–2 cm) sea-bottom sediments at the Kara Sea is presented. Pattern its spatial distribution during deglaciation and maximal sea-level is discussed. On the basis of cluster statistical analysis, chemical types of the sediments are singled out. Presented material was collected in cruises on the board of R/V “Akademik Boris Petrov” in 2000, 2001, and 2003, as well as R/V “Akademik Mstislav Keldysh” in 2015.