

УДК 624.131; 551.465

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРОЕНИЯ ИЛОВ БЕЛОГО МОРЯ НА СТАДИИ СЕДИМЕНТОГЕНЕЗА

© 2015 г. В. И. Осипов*, Д. Ю. Здобин**, В. Н. Соколов***, М. В. Иванов**

* Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,

Уланский пер.13, стр.2, Москва, 101000 Россия. E-mail: direct@geoenv.ru

** Санкт-Петербургский государственный университет,

Университетская наб., 7/9, Санкт-Петербург, 199034 Россия. E-mail: zdobin_soil@mail.ru

*** Московский государственный университет,

Ленинские горы, Москва, 119992 Россия. E-mail: sokolov@geol.msu.ru

Поступила в редакцию 15.12.2014 г.

Рассматриваются вопросы седиментогенеза современных органоминеральных донных осадков (на примере бухтовых илов Белого моря). Впервые в мировой практике изучено РЭМ-микростроение глинистых илов первых сантиметров придонного слоя, сохранность микроструктуры которых обеспечивалась методом моментальной криообработки отобранного образца. Затрагиваются вопросы структурообразования осадка в присутствии органического вещества. Закономерное изменение физико-химических свойств илов сопровождается уменьшением активной пористости грунта.

Ключевые слова: седиментогенез, современные органоминеральные осадки, РЭМ-исследования, микростроение, коагуляционные контакты, пористость.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из фундаментальных проблем современной седиментологии и грунтоведения – изучение стадийности формирования глинистого осадка. Данному вопросу посвящено большое количество публикаций, из которых за последнее время необходимо отметить [2–7]. Помимо важности изучения изменений гранулометрического состава, физико-механических свойств, химизма порового раствора трансформации глинистых минералов большой интерес для исследования представляют процессы формирования и последующего изменения микростроения осадка на самых начальных стадиях седиментации, ибо пространственная композиция расположения элементов структуры осадка и ее количественная оценка – наиболее яркая визуализация сложнейших физико-химических и биохимических процессов.

Общеизвестно, что ил – современный нелитифицированный морской органоминеральный осадок ($C_{орг} > 3\%$, $I_L > 1$ и $e \geq 0.9$) характеризуется наличием дальних коагуляционных контактов между частицами. Ил – крайне сложный объект для лабораторных исследований, поэтому его микростроение практически не изучалось, лишь

единичные работы содержат данные по осадкам, отобраным с глубины не менее 0.5 м (северо-западный шельф Черного моря) [1]. Поэтому в свете современных представлений физико-химической теории формирования дисперсных природных систем крайне важно изучить и проследить изменения микростроения глинистых илов в единой седиментационной системе “взвесь – осадок – грунт”.

МЕТОДИКА И АППАРАТУРА ИССЛЕДОВАНИЙ

Первостепенной задачей, решаемой в процессе изучения микростроения донных осадков, являлось получение максимально ненарушенного образца осадка для дальнейших лабораторных исследований. Отбор проб донных глинистых илов проводился во время экспедиционных исследований на Белом море (Кандалакшский залив, бухта Никольская, сезон 2011–2012 гг.) с применением прямооточной грунтовой трубки по строго фиксированной сетке точек, в которых ежегодно с 1996 г. осуществлялся мониторинг изменения физико-химических свойств осадков.

Отбор проб илов осуществляли поинтервально (0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–35, 35–40 см) путем внедрения в грунт одноразового пластикового режущего кольца ($V = 5 \text{ см}^3$, $\varnothing 10 \text{ мм}$) с ориентировкой “верх-низ”. Отобранный осадок вместе с пробоотборником помещался в криопробирку, герметизировался и опускался в сосуд Дьюара с жидким азотом. Одновременно для контроля производился отбор верхнего слоя ила (до 5 см) дночерпателем “Океан-0.025”. На борту судна дночерпатель с отобранной пробой раскрывался, и из него убирался придонный слой воды. Величина оставшейся суспензии не превышала 0.3–0.5 см. Затем в осадок внедрялась полая пластиковая гильза ($\varnothing 10 \text{ см}$) для ограничения площади, заливаемой жидким азотом. Затем в это ограниченное пространство по внутренней поверхности гильзы заливалось около 1.0 л жидкого азота. Образовавшаяся криогенная корка илов толщиной 0.8–1.0 см фрагментировалась на куски, которые опускались в криопробирку и также помещались в жидкий азот. Ориентировка корки илов – бурая поверхность – “верх”. Сосуд Дьюара с содержащимися в нем замороженными образцами транспортировали в лабораторию электронной микроскопии кафедры инженерной и экологической геологической геологии геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова для проведения микроструктурных исследований.

Несмотря на известные технические и логистические сложности при отборе и транспортировке проб, полученные образцы мгновенно замороженного в жидком азоте органоминерального осадка все время сохраняли природное строение. Окончательную подготовку илов для микроструктурных исследований в РЭМ проводили с помощью вакуумной морозной сушки [6, 8].

Микроструктурные исследования (качественный и количественный анализ микроструктуры образцов илов Белого моря) проводили с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1450 VP с гарантийным разрешением 3.5 нм.

Качественный анализ микроструктуры илов Белого моря осуществляли по РЭМ-изображениям при двух увеличениях: малом (250–500 крат) и большом (4000–8000 крат). В первом случае получают обзорные изображения, дающие общие представления о микроструктуре образца: наличие крупных песчаных и пылеватых зерен, крупных пор, характер взаимоотношения вмещающей тонкодисперсной глинистой матрицы и более грубодисперсного материала, ориентация структурных элементов. Во втором случае наблюдаются

тонкие детали микростроения, такие как размер и форма структурных элементов, характер их поверхности, тип контактов между глинистыми частицами и их микроагрегатами.

Количественный анализ микроструктуры глинистых грунтов проводится по РЭМ-изображениям с помощью программного обеспечения (ПО) “STIMAN 3D” [10–12]. В качестве исходной информации “STIMAN 3D” использует серию разномасштабных РЭМ-изображений, охватывающих весь диапазон изменения размеров встречающихся структурных элементов. Анализу подвергались серии, содержащие восемь изображений, полученных при увеличениях, изменяющихся в геометрической прогрессии с коэффициентом равным 2 ($\times 250$, $\times 500$, $\times 1000$, $\times 2000$, $\times 4000$, $\times 8000$, $\times 16000$, $\times 32000$). “STIMAN 3D” позволяет получать практически все морфологические показатели микроструктуры: размер и форму структурных элементов (пор и частиц), их ориентацию в пространстве и др.; и оценивать величину пористости и удельной поверхности [12]. Основные классификационные показатели микроструктуры: степень крупности структурных элементов (интегральный параметр дисперсность – D) и их ориентации в пространстве (интегральный показатель анизотропия – A) определяли с помощью Фурье-анализа полутоновых РЭМ-изображений и по ним классифицировали типы микроструктур исследуемых осадков [9].

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЛОВ

Изученные прибрежно-морские, голоценовые глинистые осадки образовывались непрерывно в течение последних 500–1000 лет при постоянном и стабильном поступлении терригенного материала с суши. В отобранных донных осадках определяли показатели основных физико-химических свойств: естественной (W_e) и гигроскопической (W_s) влажности, влажности на границе текучести (W_L) и раскатывания (W_p), число пластичности (I_p), показатель текучести (I_f), плотность частиц грунта (ρ_s), плотность грунта (ρ), пористость (n), коэффициент пористости (e) и содержание органического вещества ($C_{орг}$) (табл. 1).

В целом при поинтервальном анализе разреза донных осадков сверху вниз наблюдается классическая картина уменьшения величин физико-химических показателей (W_e – с 195 до 140%, I_f с 5.44 до 1.65), что связано с уменьшением количества свободной воды в грунтовой системе. Физические характеристики осадка, такие как плотность, наоборот закономерно увеличиваются (от 1.18 до

Таблица 1. Показатели гранулометрического состава и физико-химических свойств илов (Белое море, бухта Никольская)

Глубина отбора, см	W_e , %	W_L , %	W_p , %	W_e , %	I_p	I_L	ρ_s , г/см ³	ρ , г/см ³	n , %	e	C_{org} , %	Гранулометрический состав, в % к весу						
												1.0–0.5	0.5–0.25	0.25–0.1	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	< 0.005
0–0.3	195	119	79	2.0	40	5.44	2.57	1.18	88	7.61	7.7	3.4	4.7	5.2	53.4	22.5	9.0	1.8
0.3–0.5	187	112	81	1.9	31	4.99	2.59	1.22	86	6.122	7.6	0.1	3.1	8.4	53.5	22.7	10.0	2.1
5.0	182	111	80	1.7	31	4.72	2.61	1.23	85	5.647	6.8	0.1	5.9	8.3	52.5	22.4	9.0	1.8
10.0	179	103	69	1.9	34	4.33	2.62	1.24	85	5.484	6.8	0.1	6.0	8.2	50.1	23.4	10.1	2.1
15.0	167	104	66	2.0	35	3.98	2.62	1.25	84	5.191	5.9	1.0	3.1	8.1	48.0	27.2	9.1	3.5
20.0	161	121	86	1.8	35	2.17	2.64	1.31	81	4.26	4.8	1.2	3.5	7.9	50.6	23.9	10.4	2.5
25.0	157	118	83	1.9	35	2.13	2.65	1.32	81	4.168	5.0	–	3.0	10.0	52.9	23.5	8.9	1.7
30.0	146	117	82	1.9	35	1.83	2.66	1.34	79	3.873	3.9	0.1	4.0	9.8	52.1	23.5	8.7	1.8
35.0	149	127	89	1.5	38	1.58	2.67	1.34	80	3.973	3.0	–	3.7	9.5	52.1	22.4	10.0	2.3
40.0	140	121	91	1.6	30	1.65	2.68	1.35	79	3.764	2.9	0.5	5.2	9.1	50.7	23.2	9.3	2.0

* Примечание. Влажность: W_e – естественная, W_L – верхнего предела пластичности, W_p – нижнего предела пластичности, W_e – гигроскопическая; I_p – число пластичности, I_L – показатель текучести, ρ_s – плотность частиц грунта, ρ – плотность грунта, n – пористость, e – коэффициент пористости, C_{org} – содержание органического вещества.

1.35 г/см³), что связано с уменьшением порового пространства (величина пористости уменьшается с 88 до 79%) и уплотнением осадка под действием вышележащих горизонтов илов вследствие непрерывного процесса седиментации. В исследованной секвенции илов содержание C_{org} вниз по разрезу уменьшается с 7.7 до 2.9%, что существенно даже для полярного литогенеза. При этом происходит снижение общего количества органического вещества в осадочном материале, зависящего от ρ_s (зримая тенденция к увеличению от 2.57 до 2.68 г/см³). Причем гранулометрический состав илов с увеличением глубины практически не изменяется, следовательно, главная причина увеличения плотности частиц осадка – уменьшение содержания C_{org} .

КАЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ИЛОВ

Интервал 0.1–3.0 мм (Spec_0.1–3). Микроструктура ила сложена хаотически расположенными в пространстве обломками кремнистых скелетиков диатомовых водорослей и радиолярий разной степени сохранности. При больших увеличениях видно, что отдельные пластинчатые обломки контактируют по типу базис-скол, образуя типичную коагуляционную ячеистую микроструктуру (рис. 1а). Размер обломков изменяется от 0.1 до 50 мкм. Некоторые из обломков образуют микроагрегаты изометричной, округлой формы (1) (рис. 1б). Редко встречаются кварцевые зерна угловатой формы (2) (рис. 1б). Размер зерен изменяется от 20 до 30 мкм. Микроструктура очень рыхлая и высокопористая. Присутствуют микроагрегаты с сочленением глинистых частиц по типу скол-скол (пространственный кубический “карточный домик”) (рис. 1в). В целом на всех РЭМ-изображениях отсутствует какая-либо доминирующая ориентация твердых структурных элементов в образце.

Интервал 1.0 см (Spec_1-см). Микроструктура ила представляет рыхлую высокопористую тонкоячеистую матрицу, сложенную обломками кремнистых скелетиков диатомовых водорослей и радиолярий (рис. 2а), в которой содержатся многочисленные микроагрегаты глинисто-пылеватых частиц изометричной округлой формы (1) (рис. 2б), их размер изменяется от 10 до 15 мкм. Пылеватые частицы в микроагрегатах представлены в основном мелкими обломками диатомей пластинчатой формы и, возможно, тонкими пластинками слюды. Также встречаются включения кварцевых (2) и полевошпатовых (3) зерен угловатой формы (см. рис. 2в). Размер зерен 10–40 мкм.

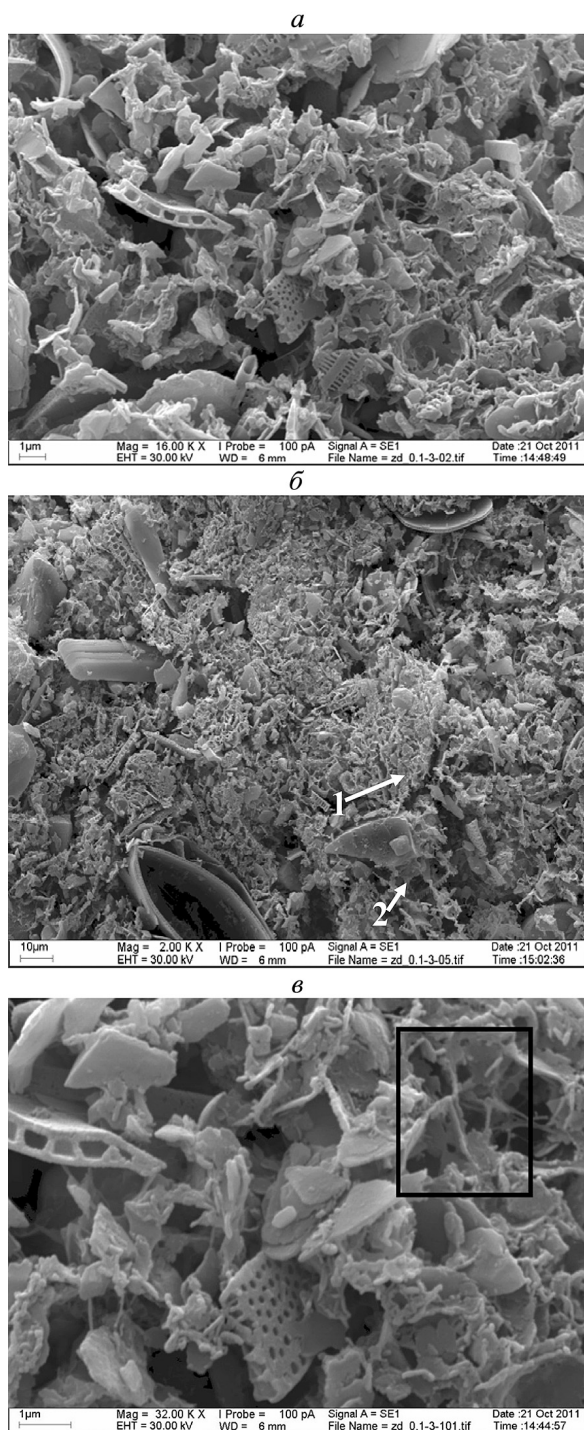


Рис 1. Микроструктура ила Белого моря, интервал 0.1–3.0 мм: *a* – ячеистая коагуляционная микроструктура; *б* – микроагрегаты изометричной формы (1), кварцевое зерно (2); *в* – контакты глинистых микроагрегатов по типу скол-скол (пространственный кубический “карточный домик”).

Какое-либо направление преимущественной ориентации твердых структурных элементов в образце отсутствует. В соответствии с классификацией Б. Грабовска-Ольшевской, В.И. Осипова и В.Н. Соколова [1] микроструктуру этого ила мож-

но отнести к категории коагуляционных ячеисто-скелетного типа.

Интервал 8.0–9.0 см (Spec_8–9-см). Микроструктура этого образца во многом похожа на предыдущую. В качестве отличия можно отметить меньшее количество и меньший размер изометричных глинисто-пылеватых микроагрегатов округлой формы, который не превышает 10 мкм (рис. 3). Эти микроагрегаты довольно равномерно распределены в коагуляционной ячеистой микроструктуре. Встречаются отдельные включения кварцевых зерен плохо окатанной и угловатой формы (2) (см. рис. 3) с размерами не более 20 мкм. Какая-либо преимущественная ориентация твердых структурных элементов в образце также отсутствует.

Интервал 20–21 см (Spec_20–21-см). Микроструктура ила сложена обломками кремнистых скелетиков диатомовых водорослей и радиолярий разной степени сохранности, а также пластинчатыми микроагрегатами глинистых частиц и мелкими пластинками слюды, которые образуют довольно рыхлую коагуляционную ячеистую микроструктуру. Размер твердых структурных элементов, слагающих эту микроструктуру, не превышает 1 мкм (рис. 4а). Встречаются и более крупные фрагменты диатомовых водорослей (1) и пластинок слюды (2) с размерами 10–30 мкм (рис. 4б). Также присутствуют редкие включения кварцевых и полевошпатовых зерен в основном неокатанной и угловатой формы. Размер таких зерен изменяется в довольно широких пределах от нескольких до 30 мкм. Ориентация твердых структурных элементов в образце также отсутствует.

Интервал 49–50 см (Spec_49–50-см). Микроструктура этого образца аналогична предыдущей. Отличается она немного большим содержанием глинисто-пылеватых микроагрегатов изометричной формы с размерами до 10 мкм (рис. 5).

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ИЛОВ

Если качественный анализ микроструктуры представляет собой в основном описание микроморфологических особенностей твердых структурных элементов и минерального скелета грунта, то количественный анализ позволяет дать количественную оценку структуры порового пространства, получить количественные значения интегральных показателей микроструктуры (параметр дисперсности D и показатель анизотропии A) и, используя классификацию микроструктур глинистых грунтов В.Н. Соколова [9], провести на

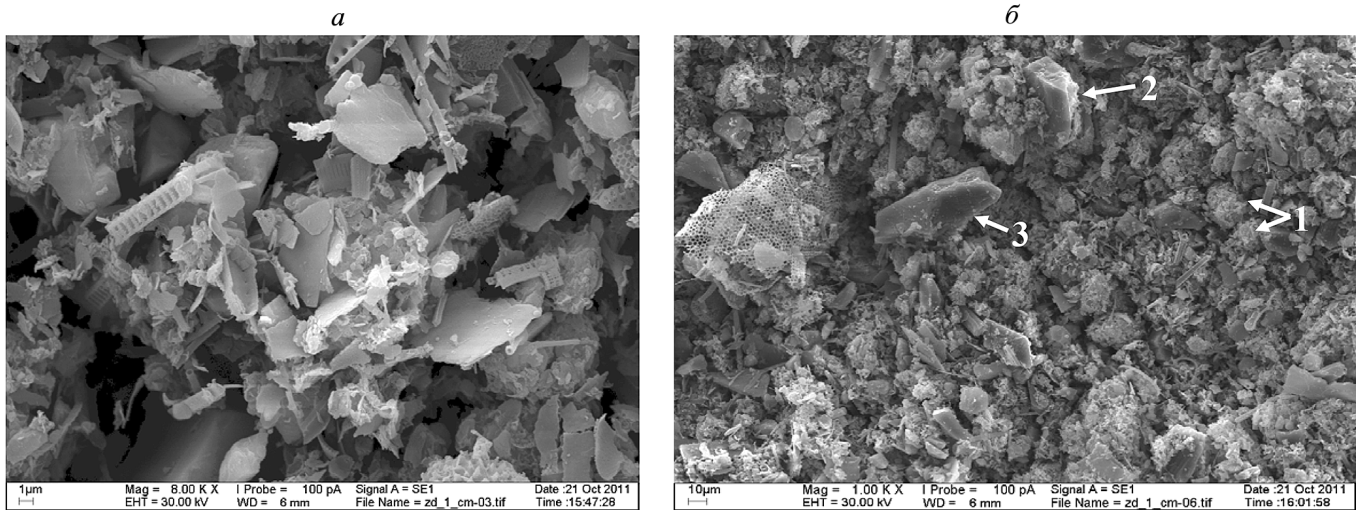


Рис 2. Микроструктура ила Белого моря, интервал 1.0 см: *а* – ячеистая коагуляционная микроструктура; *б* – микроагрегаты изометричной формы (1), кварцевое зерно (2), зерно полевого шпата (3).

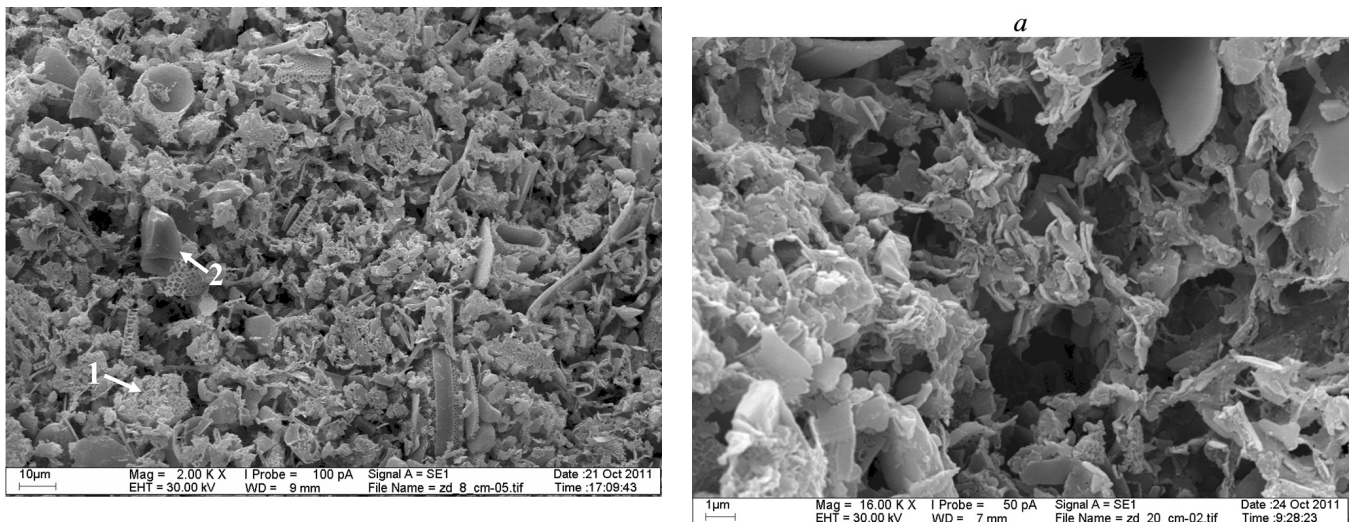


Рис 3. Ячеистая коагуляционная микроструктура ила Белого моря, интервал 8.0–9.0 см: микроагрегат изометричной формы (1), кварцевое зерно (2).

основе этих количественных характеристик классификацию типов микроструктур исследованных глинистых осадков.

В табл. 2 приводятся обобщенные результаты количественного анализа микроструктуры исследованных илов, полученные на основе статистической обработки данных кривых распределения пор по эквивалентным диаметрам, площадям, суммарным площадям и фактору формы. Даются значения общей пористости грунта, измеренной по РЭМ-изображениям ($n_{из}$), а также средние (по десяти участкам) значения интегральных параметров микроструктуры (D и A).

Проведенные исследования показали, что в микроструктуре всех исследованных образцов можно выделить четыре категории пор: D_1 – межчастич-

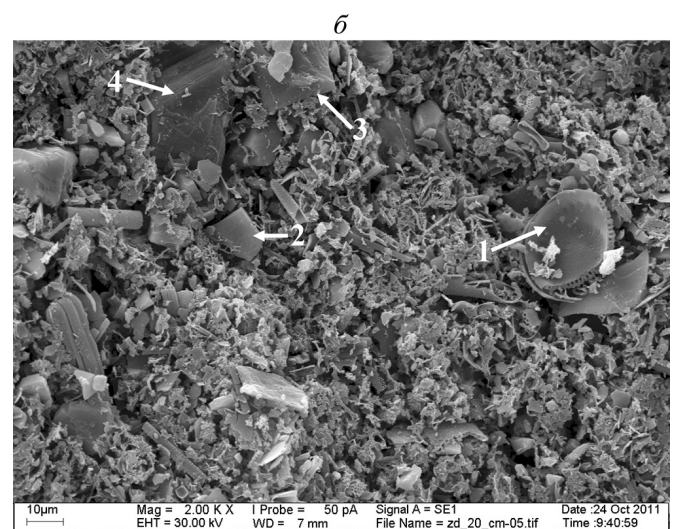


Рис 4. Микроструктура ила Белого моря, интервал 20–21 см: *а* – фрагмент ячеистой коагуляционной микроструктуры; *б* – скелет диатомовой водоросли (1), пластина слюды (2), кварцевое зерно (3), зерно полевого шпата (4).

Таблица 2. Результаты количественного анализа микроstructures илов Белого моря по РЭМ-изображениям

Горизонт	Микроморфологические параметры	Категории пор					$n_{из}$, %	A, D	Тип микроstructures
		D_1 <0.1, мкм	D_2 0.1–1.0, мкм	D_3 1.0–10, мкм	D_4 10–100, мкм	D_{max} , мкм			
0.1–3.0 мм Spec_0.1–3	N,% K _f	0.8	8.9	56.2	34.1	34.65	49.30	A=1.02 D=0.75	АІк
1.0 см Spec_1-см	N,% K _f	0.6	8.5	58.9	32.0	24.37	43.84	A=1.04 D=1.07	БІк
8.0–9.0 см Spec_8–9-см	N,% K _f	0.9	8.1	61.4	29.6	26.55	42.36	A=1.06 D=0.69	АІк
20–21 см Spec_20–21-см	N,% K _f	0.6	8.9	61.0	29.5	25.04	41.02	A=1.05 D=0.53	АІк
49–50 см Spec_49–50-см	N,% K _f	1.1	8.9	62.1	27.9	19.8	40.58	A=1.07 D=0.72	АІк

Примечание: N – вклад в общую пористость указанной категории пор, K_f – коэффициент формы пор, рассчитываемый по методу градиента интенсивности сигнала [11].

ные ультрамикропоры; D_2 – тонкие межультрамикроагрегатные микропоры; D_3 и D_4 – мелкие и крупные межмикроагрегатные микропоры. Такие типы пор обычно выделяют в глинистых породах, сложенных преимущественно микроагрегатами глинистых частиц.

Из данных количественного анализа следует, что в поровом пространстве всех образцов по количеству преобладают самые маленькие межчастичные ультрамикропоры D_1 . Однако из-за малых размеров пор их вклад в общую пористость наименьший и составляет всего 0.6–1.1% (см. табл. 2).

Максимальный вклад в поровое пространство вносят мелкие межмикроагрегатные микропоры (D_3) – до 62.1%, меньший объем занимают крупные межмикроагрегатные микропоры (D_4) – до 34.1%. Вклад межультрамикроагрегатных микропор (D_2) изменяется незначительно и составляет 8.1–8.9%.

Согласно представленным в табл. 2 данным, следует, что несмотря на очень небольшой интервал отбора образцов (всего 0.5 м), по мере возрастания глубины их отбора, наблюдается уменьшение общей пористости осадков $n_{из}$, измеренной по РЭМ-изображениям от 49.30 до 40.58%. Эти данные подтверждают зависимость изменения общей пористости n , вычисленной по стандартной грунтоведческой методике, от глубины залегания осадка. Несовпадение абсолютных значений $n_{из}$ и n объясняется известным несовпадением зна-

чений пористости, получаемых при планиметрическом анализе плоских РЭМ-изображений, с объемными значениями n , получаемыми при использовании классической методики, а также наличием более крупных макропор и неоднородностей, находящихся за пределами исследования в РЭМ. Причем эти несовпадения возрастают при изучении высокопористых структур, какими и являются исследуемые илы.

Тенденция уменьшения общей пористости с глубиной залегания осадка, даже в пределах 50-сантиметрового интервала глубин, сопровож-

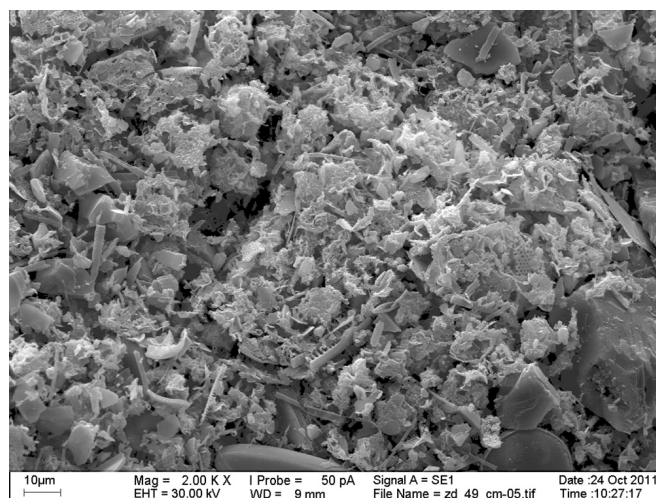


Рис 5. Ячеистая коагуляционная микроstructures ила Белого моря, интервал 49–50 см.

дается уменьшением максимального размера пор (D_{\max}) от 34.65% на глубине 3 мм, до 19.80% на глубине 50 см. Помимо этого происходит сокращение вклада крупных межмикроагрегатных микропор (D_4) с 34.1 до 27.9%, которое обуславливает соответствующее возрастание мелких межмикроагрегатных микропор (D_3) с 56.2 до 62.1%. Описываемые процессы пока не затрагивают какие-либо значительные изменения содержания наиболее мелких категорий пор – межчастичных ультрамикропор (D_1) и межультрамикроагрегатных микропор (D_2).

Анализ коэффициента формы пор показал, что в исследуемых образцах илов в основном преобладают поры анизометричной формы ($K_f = 0.25-0.50$). Поры более изометричной формы ($K_f = 0.58-0.66$) встречаются реже.

Анализ интегральных показателей микроструктуры (D и A), а также данных о характере структурных связей между твердыми структурными элементами позволил установить, что большинство исследованных илов относятся к классу тонкодисперсных микроструктур “А”, подклассу слабоориентированных “Г” и к группе коагуляционных микроструктур “к”, т.е. микроструктура тонкодисперсная, слабоориентированная, коагуляционная – А_к. И только микроструктура образца, отобранного с глубины 8 см, относится к среднедисперсной “Б”, слабоориентированной “Г”, коагуляционной “к” – Б_к.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно констатировать, что даже в пределах чрезвычайно малого интервала глубин 0.3–50 см при незначительном уплотнении свежееосажденных илов Белого моря начинают проявляться процессы седиментогенеза осадков, выразившиеся в изменении физико-химических свойств.

При этом происходит видимое изменение структуры порового пространства органоминерального кремниевого осадка, заключающееся в уменьшении общей пористости и максимального размера микропор и возрастании вклада мелких межмикроагрегатных микропор за счет сокращения содержания крупных межмикроагрегатных микропор.

Проведенные исследования также позволяют сказать, что полученные значения физико-химических свойств илов Белого моря хорошо согласуются с данными микроструктурных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Грабовска-Ольшевска Б., Осипов В.И., Соколов В.Н.* Атлас микроструктур глинистых пород. Варшава: Изд-во Panstowe Wydawnictwo Naukowe, 1984. 414 с.
2. *Здобин Д.Ю.* Стадийность образования глинистых грунтов в присутствии органического вещества // *Геозкология*. 2013. № 3. С. 259–263.
3. *Козлов С.А.* Формирование структуры и инженерно-геологических свойств глубоководных отложений Тихого океана // *Тр. НИИГА – ВНИИОкеангеология*. Т. 198. СПб.: ВНИИОкеангеология, 2003. С. 99–113.
4. *Леш А.Ю., Маккавеев П.Н., Савичев А.С., Кравчишина М.Д. и др.* Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море в сентябре 2011 г. // *Геология морей и океанов. Тр. XX Междунар. науч. конф. по морской геологии*. Т. 1. М.: ГЕОС, 2013. С. 98–99.
5. *Осипов В.И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.
6. *Осипов В.И., Соколов В.Н.* Глины и их свойства. М.: ГЕОС, 2013. 575 с.
7. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Еремеев В.В.* Глинистые покрышки нефтяных и газовых месторождений. М.: Наука, 2001. 237 с.
8. *Осипов В.И., Соколов В.Н., Румянцева Н.А.* Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 1989. 211 с.
9. *Соколов В.Н.* Инженерно-геологическая классификация микроструктур глинистых пород // *Инженерная геология*. 1988. № 4. С. 25–41.
10. *Соколов В.Н.* Модели микроструктур глинистых грунтов // *Инженерная геология*. 1991. № 6. С. 32–40.
11. *Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В.* Исследование микроструктуры грунтов с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений // *Геозкология*. 2008. № 4. С. 1–6.
12. *Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., Мельник В.Н.* Изучение характеристик микроструктуры твердых тел с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2004. Т. 68. № 9. С. 1332–1337.

REFERENCES

1. Grabowska-Olszewska, B., Osipov, V.I., and Sokolov, V.N. *Atlas mikrostruktur glinistych porod* [Atlas of the microstructure of clay soils]. Warszawa, Panstowe Wydawnictwo Naukowe, 1984. 414 p. (in Russian).
2. Zdobin, D.Yu. *Stadiinost' obrazovaniya glinistych gruntov v prisutstvii organicheskogo veshchestva* [Stages of clay formation in the presence of organic

- substance]. *Geoekologiya*, 2013, no. 3, pp. 259–263 (in Russian).
3. Kozlov S.A. [Formation of structure and engineering geological properties of deep-sea deposits in the Pacific Ocean]. *Trudy NIIGA-VNIIOkeangeologiya* [Proc. NIIGA-VNIIOkeangeologiya]. St. Petersburg, VNIIOkeangeologiya, 2003, vol. 198, pp. 99–113. (in Russian).
 4. Lein A.Yu., Makkaveev P.N., Savichev A.S., Kravchishina, M.D. et al. [Processes of suspension transformation to sediment in the Kara Sea in September 2011]. *Trudy XX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii po morskoi geologii "Geologiya morei i okeanov"* [Proc. XX Int. Sci. Conf. "Geology of seas and oceans"]. Moscow, GEOS, 2013, vol. 1, pp. 98–99. (in Russian).
 5. Osipov V.I. *Priroda prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv glinistykh porod* [Origin of strength and deformational properties of clay]. Moscow, MGU, 1979, 232 p. (in Russian).
 6. Osipov V.I., and Sokolov V.N. *Gliny i ikh svoystva* [Clays and their properties]. Moscow, GEOS, 2013, 575 p. (in Russian).
 7. Osipov V.I., Sokolov V.N., and Eremeev V.V. *Glinistyte pokryshki neftnykh i gazovykh mestorozhdenii* [Clay seals of oil and gas deposits]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 237 p. (in Russian).
 8. Osipov V.I., Sokolov V.N., and Rumyantseva N.A. *Mikrostruktura glinistykh porod* [Microstructure of clay soils]. Moscow, Nedra, 1989. 211 p. (in Russian).
 9. Sokolov V.N. *Inzhenerno-geologicheskaya klassifikatsiya mikrostruktur glinistykh porod* [Engineering geological classification of clay microstructures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1988, no. 4, pp. 25–41. (in Russian).
 10. Sokolov V.N. *Modeli mikrostruktur glinistykh gruntov* [Models of clay microstructures]. *Inzhenernaya geologiya*, 1991, no. 6. pp. 32–40. (in Russian).
 11. Sokolov V.N., Yurkovets D.I., and Razgulina O.V. *Issledovanie mikrostruktury gruntov s pomoshch'yu komp'yuternogo analiza REM-izobrazhenii*. [Study of soil microstructure with computer analysis of SEM images]. *Geoekologiya*, 2008, no. 4. pp. 1–6. (in Russian).
 12. Sokolov V.N., Yurkovets D.I., Razgulina O.V., and Mel'nik V.N. *Izuchenie kharakteristik mikrostruktury tverdykh tel s pomoshch'yu komp'yuternogo analiza REM izobrazhenii* [Study of microstructures of solids using the computer analysis of SEM images]. *Izv. RAN. Ser. Fiz.*, 2004, vol. 68, no. 9. pp. 1332–1337. (in Russian).

FEATURES OF SILT MICROSTRUCTURE FORMATION AT THE SEDIMENTOGENESIS STAGE IN THE WHITE SEA

V.I. Osipov*, D.Yu. Zdobin, V.N. Sokolov***, M.V. Ivanov****

* *Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, Ulanskii per.13, bld.2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: direct@geoenv.ru*

** *St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7/9, St. Petersburg, 199034 Russia. E-mail: zdobin_soil@mail.ru*

*** *Geological Faculty, Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory, bld. 1, Moscow, 119992 Russia. E-mail: sokolov@geol.msu.ru*

The Holocene littoral clay sediments in the White Sea, i.e., organomineral bottom silts, were the objects of study. The work was aimed at investigation of formation and subsequent transformation of deposit microstructure at the initial stages of sedimentation from the viewpoint of current ideas in the physicochemical theory of forming natural fine-grained systems. Silt was sampled in intervals (0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–35, 35–40 cm) from the ship using the sampling thief and dredger "Ocean-0.025" to preserve the natural structure of samples. Silt was prepared for microstructural SEM investigation by the method of vacuum cryogenic processing. The following physicochemical parameters were controlled in samples: moisture (natural and air-dry moisture, moisture at plastic and liquid limits), plasticity index, liquidity index, porosity, porosity coefficient, and the organic matter content.

Microstructural studies (qualitative and quantitative analyses of the White Sea silt microstructure) were performed with scanning electron microscope (SEM) LEO 1450 VP. Qualitatively, the silt microstructure was analyzed by SEM images at two magnifications (x250–500 and x4000–8000). The quantitative analysis was performed with "STIMAN 3D" software using a series of 8 SEM images at magnifications x250, x500, x1000, x2000, x4000, x8000, x16000, x32000.

The following regularities were revealed from the top to the bottom in the sediment profile: a decrease in the physicochemical indices (W - from 195 to 140% and I , from 5.44 to 1.65), a regular increase in density (from 1.18 to 1.35 g/cm³) and a decrease in porosity from 88 to 79% as well as in the organic substance content C_{org} (from 7.7 to 2.9%); with the particle-size distribution remaining virtually constant.

The micromorphology of solid structural units and silt mineral skeleton was qualitatively described. Quantitative estimation permitted obtaining the curves of pore distribution by the equivalent diameters, areas, total areas and shape factor. Inter-particle ultramicropores (0.1–1.0 μm); fine and coarse intermicroaggregate micropores (1.0–10 and 10–100 μm) were distinguished. Proceeding from the quantitative values of integral microstructural indices (grain-size parameter D and anisotropy parameter A), the studied clay sediments were classified by the microstructure types. The bulk of investigated samples were referred to the fine-grained class, weakly-ordered subclass, and coagulation microstructure group.

The performed research proves that even within a very narrow depth interval (0.3–50 cm), upon insignificant compaction of newly deposited silt in the White Sea, the features of sedimentogenesis of organomineral sediments are already manifested in the transformation of physicochemical properties and the pore space fabrics. This transformation implies a decrease in the general porosity and the maximal size of micropores, an increase in the amount of fine intermicroaggregate micropores at the expense of the reducing large intermicroaggregate micropores.

Keywords: *sedimentogenesis, recent organo-mineral sediments, SEM studies of microstructure, coagulation contacts, porosity.*