

УДК 551.465; 624.131

ПОКАЗАТЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ ШЕЛЬФОВЫХ ОСАДКОВ

© 2019 г. Д. Ю. Здобин

Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия
e-mail: trestgrii lab@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2018 г.

После доработки 03.10.2018 г.

Принята к публикации 05.02.2019 г.

Рассматриваются результаты многолетних мониторинговых исследований физико-химических свойств голоценовых илов Кандалакшского залива Белого моря. На основе всестороннего анализа соотношения величин естественной влажности (W_e), влажности верхнего предела пластичности (W_L) и содержания органического вещества ($C_{орг}$) по глубине непрерывной секвенции морских органоминеральных грунтов делается вывод о возможности разделения осадка по физико-химическим показателям путем введения показателя трансформации осадка — I_{mo} . Анализ распределения свойств осадка по глубине залегания, проведенный на других акваториях (море Лаптевых, Южно-Китайское море), позволяет предположить универсальность данного показателя. Постулируется необходимость разделения единой природной системы осадок–ил–текучая глина граница седиментогенез–диагенез (ил–текучая глина) по $W_e \geq W_L$ и $C_{орг} \geq 3\%$.

Ключевые слова: Белое море, шельф, донные осадки, стадии образования, седиментогенез, ил, глина, органическое вещество, пластичность, трансформация осадка

DOI: 10.31857/S0030-1574593476–484

ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальной проблемой седиментологии является выбор критериев разделения пограничной системы придонного слоя вода–донные осадки (Benthic Boundary Layer), который в настоящее время из-за неопределенности литологической терминологии исследователи называют по-разному. Если термин “придонный нефелоидный слой” (как составная часть системы вода–донные осадки) давно утвердился и не вызывает особых возражений, то обозначение наддонной суспензии «наилком» (fluffy layer) [7], не имеющей строгих физических характеристик, хоть и достаточно широко распространено, но отчасти «размыто», субъективно и не имеет четкого физического смысла. Синонимом «наилка» является «жидкий флокулированный слой» [5], который более точен, но, тем не менее, так же необоснован.

Еще более запутана и неоднозначна, чем в системе «взвесь–осадок», понятийно-терминологическая база при наименовании объектов ранжирования в системе осадок–ил–глина. «Наилком», «жидкий ил», «полужидкий ил», «пластичный ил» — вот далеко не полный перечень терминов, встречающихся в публикациях, посвященным вопросам седиментологии, лито-

логии и грунтоведения при описании верхнего слоя донных осадков.

В связи с этим возникает вопрос о введении в описание морских осадков некоего «универсального показателя трансформации», характеризующего степень изменения описываемой системы, и на основании которого становится возможным строгое математическое выделение (ранжирование) стадий процесса седиментогенеза с вполне конкретной терминологической базой [4]. По нашему мнению, данный показатель должен удовлетворять ряду условий:

- распространяться на все природно-климатические зоны;
- не зависеть от скорости поступления осадочного материала в бассейн седиментации;
- не зависеть от минералогического и гранулометрического состава взвеси;
- не зависеть от гидродинамического режима акватории, включая скорость придонных течений;
- не зависеть от химического состава морской воды бассейна седиментации;
- применяться к осадкам шельфа (для океанических осадков и осадков открытого моря у автора недостаточно репрезентативных данных).

Основой для утверждения о существовании индекса трансформации осадка — I_{mo} — явился неоспоримый постулат, что «донный осадок — трехфазная, четырехкомпонентная (твердая, жидкая, газообразная и биотическая), термодинамически неустойчивая природная система, изменение одной компоненты в которой ведет к кардинальной перестройке всего объекта».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом изучения явились прибрежно-морские донные осадки бухты Никольская Кандалакшского залива Белого моря, где ежегодно с 1996 г. осуществлялся мониторинг изменения физико-химических свойств осадков. Полигон наблюдений представлял собой сеть точек, на которых во время полевых экспедиционных исследований производился отбор прямооточной грунтовой трубкой проб донных глинистых илов. Важнейшей задачей, решаемой в процессе изучения состава, микростроения и физико-химических свойств донных осадков являлось получение максимально ненарушенного образца грунта для дальнейших лабораторных исследований. На каждой мониторинговой точке (6) осуществлялся поинтервальный отбор проб илов: 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–25, 25–30, 30–35, 35–40, 49–50 см. Помимо отбора проб на стандартные исследования (гранулометрический и минеральный состав, содержание $S_{орг}$, определение физико-химических характеристик осадка) осуществлялся отбор проб илов на РЭМ-исследования. Методика отбора заключалась во внедрении в осадок 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. Параллельно, для контроля производился отбор верхнего слоя (до 5 см) дночерпателем «Океан-0.025». На борту судна дночерпатель с отобранном грунтом раскрывался и из него убирался придонный слой воды. Величина оставшейся суспензии не превышала 0.3–0.5 см. Затем в грунт внедрялась полая пластиковая гильза ($\varnothing 10 \text{ см}$) для ограничения площади, заливаемой жидким азотом. Далее 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, опускались в криопробирку, и также помещалась в жидкий азот. Сосуд Дьюара, вместе с содержащимися в нем замороженными образцами, транспортировался в лабораторию электронной микроскопии для проведения микроструктурных исследований. Несмотря на известные технические и логистические сложности при отборе и транспортировке материала, полученные образцы мгновенно замороженного в жидком азоте органо-минерального осадка все время сохраняли исходное природное строение. Окончательная подготовка илов для микроструктурных РЭМ-исследований проводилась с помощью вакуумной морозной сушки таких предварительно замороженных в жидком азоте образцов [4, 7].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе длительных (15-летних) мониторинговых исследований донных осадков бухты Кандалакшского залива Белого моря выработался приемлемый технологический алгоритм изучения осадков переходной зоны, который был успешно применен и к аналогичным образованиям других морей — моря Лаптевых и Южно-Китайского.

Проблемы определения параметра ранжирования. В свете поставленной проблематики встает вопрос о параметрах (критериях) рассматриваемой взаимосвязанной системы вода–донные осадки–горная порода, по которым она будет разделена на составные части.

Гранулометрический состав. Первоначально рассматривался вариант использования в расчетах I_{mo} процентного содержания наиболее представительной (либо лабильной, либо доминирующей) фракции гранулометрического состава донных отложений. Дальнейшие исследования поставили под сомнение корректность данного предложения по двум основным причинам теоретического и методологического характера.

Во-первых, методика определения гранулометрического состава горных пород, в том числе и донных осадков, основана на применении четырех совершенно разных физических законов:

- а) свободное движение жидкости — фракция $>2 \text{ мм}$ (крупнообломочные частицы);
- б) капиллярное поднятие — фракция 2–0,1 мм (песчаные частицы);
- в) падение сферических частиц в жидкости (закон Стокса) — фракция 0,1–0,002 мм (пылеватые частицы);

г) верхняя граница действия Броуновского движения в глинистой суспензии 0,002 мм (глинистые частицы).

Как показывают последние экспериментальные исследования определения гранулометрического состава глинистых пород с помощью лазерных анализаторов, отклонения от теоретически предсказанных в двух последних фракциях весьма существенны.

Во-вторых, в гранулометрическом отношении донные осадки — крайне сложная и нестабильная фазовая система, в которой часто невозможно четко выделить определенные фракции. Наличие гидрофильных глинистых минералов в составе твердой фазы донных осадков, повсеместное присутствие растворенного органического вещества, значительный размер двойного электрического слоя, окружающего частицы глинистых минералов — все эти факторы, накладываясь друг на друга, суммируются и существенно искажают истинную картину распределения частиц по фракциям в донном осадке, порой резко завышая содержание фракций 0,005, 0,002 за счет более мелких, в ряде случаев агрегированных между собой, частиц. Кроме того, применение совершенно разных методов определения самого гранулометрического состава (отмучивания, ареометрический, пипеточный, лазерный), а также различных способов пробоподготовки осадка к анализу (механический, физический, физико-химический), учитывая вышеназванные причины, ведет к тому, что получаемые результаты гранулометрического состава *неоднозначны* и порой просто *несопоставимы* между собой [2].

Минеральный состав. Вертикальное изменение минерального состава донных (даже при полярном литогенезе) осадков — общеизвестный факт. Данное явление связано, как правило, с двумя независимыми между собой факторами: 1) геологическим — существенным изменением геолого-геоморфологических условий седиментации осадка (объем, скорость и время поступления осадочного материала в бассейн седиментации; 2) генетическим — трансформационными изменениями глинистых минералов в процессе седиментогенеза и раннего диагенеза. Оба этих фактора могут действовать либо по отдельности, либо совместно, накладываясь друг на друга, что существенно сглаживает и без того запутанную картину седиментации. Для наших построений критически важным является второй фактор, ибо только он дает однозначное подтверждение

изменению минерального состава твердой фазы осадка в рассматриваемом процессе. Но и здесь присутствуют определенные граничные параметры. Во-первых, первичный набор глинистых минералов взвеси (чем больше в составе глинистых минералов донной взвеси смешанно-слоистых образований, тем более отчетливо прослеживаются трансформационные изменения). Во-вторых, сами по себе изменения настолько незначительны и проявляются по вертикали осадка так плавно и постепенно, что о явном, четком и однозначном разделении всей системы на составляющие не может идти и речи.

Строение осадка. Важнейшей характеристикой донного грунта является тип его микростроения. Результаты РЭМ-исследований образцов донных осадков методом глубокой криогенной заморозки показали, что микроструктура всего исследованного интервала илов (0–50 см) образует типичную коагуляционную ячеистую микроструктуру.

Анализ интегральных показателей микроструктуры, а также данных о характере структурных связей между твердыми структурными элементами позволил установить, что все исследованные донные осадки относятся к классу тонкодисперсных микроструктур, подклассу слабоориентированных и группе коагуляционных. Вертикальные изменения в микростроении касаются исключительно морфологии и геометрии порового пространства: с глубиной пористость уменьшается, а плотность донного осадка растет (рис. 1, 2), что также исключает однозначную возможность градации рассматриваемой системы на отдельные составляющие.

Геохимические параметры. Абсолютно логичны и понятны геохимические критерии разделения интересующих нас систем (рН, ЕН, тренды в изменениях отдельных химических элементов и др.). Главная проблема в данных построениях — прямая зависимость этих параметров от первичного состава осаждающейся взвеси и химии морской воды — в каждом конкретном бассейне седиментации эти параметры уникальны.

Математические модели. Большое значение (на наш взгляд, во многом излишнее) в последние годы среди определенного круга океанологов приобрело математическое моделирование гидродинамических процессов придонного слоя, связанное с расчетом скорости движения (осаждения) частиц в определенном слое воды (прежде всего придонном) в зависимости от параметров

дисперсной фазы (размер, окатанность, минеральный состав, удельный вес как единичных частиц, так и микроагрегатов), с одной стороны, и дисперсной среды (плотность, вязкость, температура, скорость и т. д.) — с другой [19–27].

Вплотную к физическим моделям придонного слоя примыкают исследования, рассматривающие данный объект с позиций физической и коллоидной химии. К этому ряду следует отнести работы по измерению дзета-потенциала в осадках и измерение сорбционной емкости частиц.

Несмотря на кажущуюся всестороннюю изученность по отдельности тех или иных компонентов рассматриваемой природной системы, все построенные модели, основанные на том или ином критериальном признаке, обладают одним существенным недостатком — отсутствием комплексности в описании объекта и ответа на главный вопрос — чем же принципиально одна подсистема отличается от другой.

Таким образом, становится очевидным, что возможный индекс трансформации осадка должен некое соотношение четырех компонент (твердой, жидкой, органической и газовой) «донной системы», которые меняются по вертикали вследствие протекания геологических процессов.

Наиболее полно изучена твердая фаза донного осадка, наименее — газообразная. Промежуточное положение занимают жидкая и органическая составляющая. Если изучение жидкой фазы в целом укладывается в общий тренд океанологических исследований, то обратная картина наблюдается в изучении органической составляющей осадка.

Органическая компонента донного осадка. Образование и разрушение органического вещества является важнейшим процессом, протекающим в биосфере, источником постоянной химической энергии для превращения большинства неорганических соединений. Совокупность этих превращений составляет цикл углерода, определяющий круговорот других химических элементов. Не являются исключением и современные процессы морской седиментации, где влияние органического вещества на формирование состава, строения и физико-химических свойств донных глинистых осадков особенно велико.

Однако, несмотря на важность изучения $S_{орг}$ в современных донных осадках, до последнего времени данной компоненте уделяли недостаточно много внимания по сравнению с другими, что связано, вероятно, со сложностью самого объекта для детального изучения. В последнее

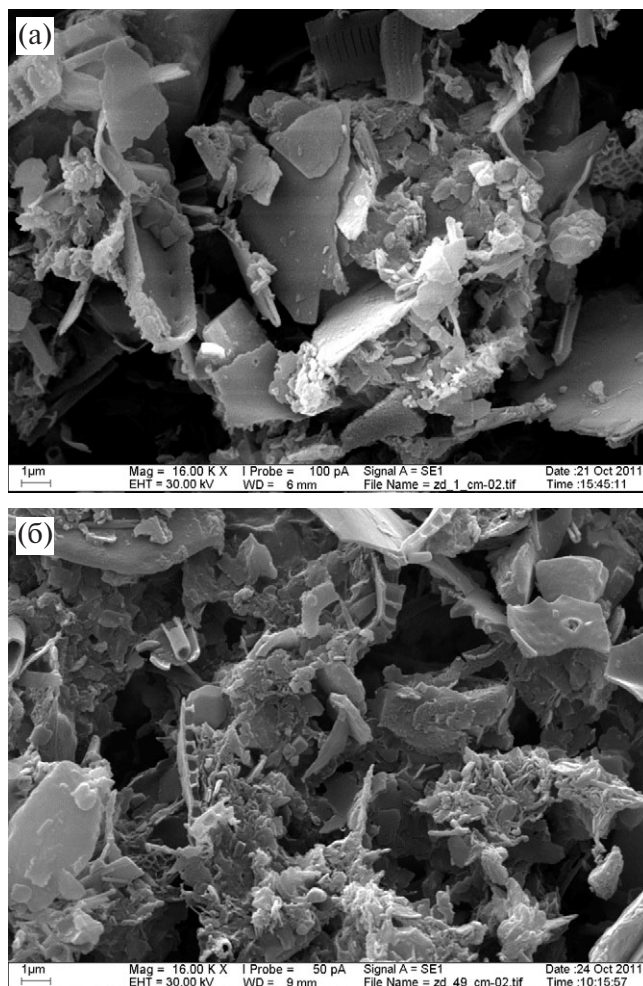


Рис. 1. Микроструктура образцов ила бухты Никольская Кандалакшского залива Белого моря: (а) — глубина 1 см; (б) — глубина 49 см.

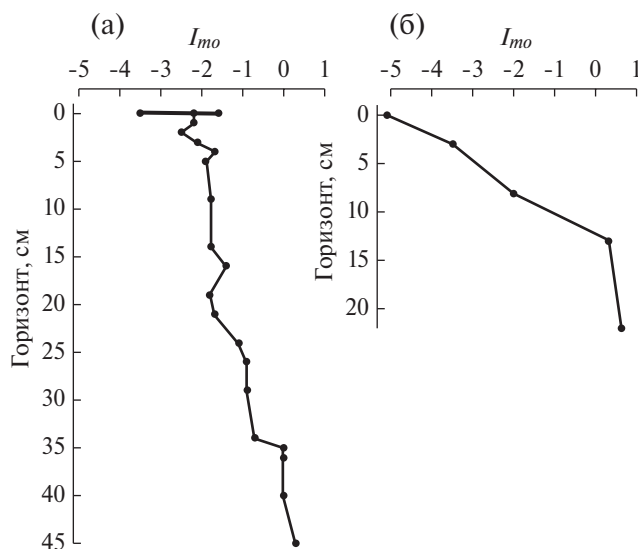


Рис. 2. График изменения показателя трансформации осадка I_{mo} в илах: (а) бухта Никольская Кандалакшского залива Белого моря; (б) — бухта Моржовая, море Лаптевых [4].

время были получены принципиально новые данные поведения $C_{\text{орг}}$ в единой системе взвесь—поверхностный слой осадков (наилкок)—донные отложения [1, 6].

Особое значение в изучении состава донных осадков имеет органическое вещество (ОВ), которое в силу известных причин является важнейшим компонентом, определяющим все последующие трансформации осадка. Исследованию состава ОВ в современных морских осадках посвящены работы Н. Г. Романкевича [12, 13], И. А. Немировской [8], А. Ю. Леин [7], М. Д. Кравчишиной [6], Н. А. Беляева [1] и многих др. Анализ биогеохимических процессов, участвующих в преобразовании ОВ как водной взвеси, так и осадков, проводится с использованием гидрохимических, геохимических, микробиологических, радиоизотопных и изотопных методов. Для океанологического подхода характерно детальное изучение состава ОВ для создания как частных, так и общих биогеохимических схем.

Результаты исследований $C_{\text{орг}}$ взвеси и донных осадков Белого моря даны в работе Н. А. Беляева [1]. Во-первых, по совокупности данных о молекулярном составе алканов, изотопном составе ОВ и величинах C/N отношения был определен преимущественно терригенный генезис ОВ осадков Белого моря. Во-вторых, преобладание терригенного ОВ над планктоногенным связано с генезисом органической составляющей взвеси, т. е. поступлением осадочного материала с твердым стоком рек. В-третьих, наиболее существенное изменение состава органогеохимических маркеров происходит в тонком пограничном слое вода—дно [7].

Среднее содержание растворенного органического вещества (РОУ) в водах Белого моря, по обобщенным данным, составляет 4 мг/л, в поровых водах верхнего слоя (1–5 см) донных осадков — 135 мг/л, снижаясь к слою 10–15 см до 100 мг/л. Концентрация взвешенного органического вещества (ВОУ) колеблется от 14 до 365 мкг/л при средней концентрации 109 мкг/л. Средняя концентрация в поверхностном слое составляет 150 мкг/л. Взвесь Белого моря летне-осеннего периода по C/N отношению и молекулярному составу углеводов имеет преимущественно терригенный генезис (60–70% ВОУ). На долю планктоногенного и микробиального ОВ приходится, соответственно, в среднем по 15–20% [1]. Результаты Н. А. Беляева полностью укладываются в числовые зна-

чения $C_{\text{орг}}$, полученные нами в рамках данной работы, и согласно которым максимальное содержание $C_{\text{орг}}$ приурочено к интервалу 0–5 см.

Следовательно, рассмотрение проблемы формирования физико-химических свойств морских органо-минеральных грунтов невозможно без анализа состава $C_{\text{орг}}$ взвеси и донных осадков, так как и на границе раздела вода—поверхностный слой, и далее по глубине разреза донных глинистых отложений именно степень трансформации органического вещества влияет на физико-химические свойства осадка.

Из вышеизложенного вытекает положение о преимущественно терригенном характере ОВ во взвеси Белого моря. Приняв его за исходное, можно утверждать, что при попадании в бассейн седиментации глинистая частица уже гидратирована и на своих контактах (сколах и базисах) несет значительное количество (до 70%) $C_{\text{орг}}$, которое адсорбировано на его поверхности при транспортировке. Следовательно, можно предположить, что оставшиеся 30% планктоногенного $C_{\text{орг}}$ являются катализатором агрегации глинистых частиц между собой.

Данные Н. А. Беляева для Кандалакшского залива свидетельствуют о преимущественно терригенном органическом веществе взвеси. Однако для бухт фьордового типа с большой биологической продуктивностью можно говорить как минимум о смешанном (терригенно-планктоногенном) характере органического вещества взвеси.

Предположения о преимущественно биогенном механизме формирования морских органо-минеральных грунтов подтверждаются данными лабораторных исследований структурообразования глинистых грунтов в присутствии $C_{\text{орг}}$.

В рамках данного исследования было проведено моделирование поведения осадения взвеси из чистых мономинеральных разностей (монтмориллонит, гидрослюда и каолинит) в присутствии белков, жиров и углеводов разной концентрации (1, 3, 5%). Эксперименты показали, что $C_{\text{орг}}$ — мощнейший катализатор коагуляции глинистой взвеси. Например, добавление в суспензию монтмориллонита 3% углеводов ведет к уменьшению количества фракции глины (<0.002 мм) в 15 раз (с 76 до 5%) и соответствующему увеличению фракции пыли (0.1–0.002) в 3.5 раза (с 23 до 78%), что напрямую связано с образованием микроагрегатов.

Эти результаты крайне важны, т. к. подтверждают принципиальное положение, что даже ми-

нимальное количество $C_{\text{орг}}$ является «спусковым крючком» и катализатором коагуляции, а также агрегации отдельных глинистых частиц, находящихся во взвеси, в микроагрегаты с дальнейшим осаждением под действием гравитации на морское дно.

Вторым организующим моментом в наших построениях стали принятые в грунтоведении частные (по определенному свойству) классификации грунтов. Так, по показателю текучести глинистые грунты подразделяются на текучие, пластичные и твердые. Этот расчетный показатель оперирует двумя значениями: W_L — влажность на границе текучести и W_p — влажность на границе раскатывания. Влажность на границе раскатывания — та влажность в глинистой породе, когда грунт переходит из пластичного состояния в твердое. Для наших построений имеет значение показатель W_L . Влажность на границе текучести выбрана как одна из «критических точек» состояния осадка, в которой силы сцепления (c) и угол внутреннего трения (φ) стремятся к 0 (в общем виде — структурная прочность осадка), что характерно для перехода любой глинистой породы из пластичного состояния в текучее.

В-третьих (по счету, но никак не по значению), основой для построений послужили исследования стадийности формирования глинистых отложений. Необходимо отметить, что изучение стадийности процессов формирования глинистых пород вообще и осадка в частности — одна из важнейших задач современной литологии. Практически все исследователи в той или иной степени выделяют это направление среди других аспектов литологии в самостоятельную дисциплину — седиментологию. По данной проблематике существуют как обобщающие монографии, отражающие ту или иную сторону седиментационного процесса, так и отдельные работы, посвященные изучению влияния на него того или иного свойства [15, 16, 18].

Показатель трансформации. Следует еще раз подчеркнуть, что стадия седиментогенеза, в ряду седиментогенез—диагенез—катагенез, наиболее значима, так как исходный минеральный состав, наличие биотической составляющей и физико-химические условия структурообразования определяют в последующем характер любых трансформаций в грунте.

Хотя по терминологии самого верхнего (придонного) слоя осадка существуют разные трактовки («седиментогенез» (Н. М. Страхов), «сингенез» (Л. Б. Рухин) «диагенез» (Н. Б. Вас-

соевич)), все без исключения авторы подчеркивают обособленность этого образования из-за уникальности его свойств и важности процессов, в нем происходящих. В свою очередь, специалисты по морскому грунтоведению также искали способ разделения единой осадочной толщи на «ил» и «глину», и предлагали свои критерии для разделения геологического разреза. В частности, А. Б. Шпиковым было предложено соотношение $W_e = 2W_L$ [16, 17], которое по факту связывало между собой примерное соотношение твердой и жидкой компоненты осадка.

Качественный прорыв в изучении процесса структурообразования донных осадков начался с момента применения понятийного аппарата физико-химической механики дисперсных сред, с помощью которого удалось построить двухфазную модель формирования глинистых илов [9–11].

Важнейшей составляющей этого труда стало теоретическое обоснование стадий процесса литогенеза с привлечением большого массива лабораторных данных по физико-механическим свойствам глинистых пород, анализа порового пространства, типов контактов и типов микроструктур с использованием электронной микроскопии.

В итоге было выделено три стадии литогенеза: диагенез (ранний и поздний), катагенез (ранний, средний и поздний) и метагенез.

Ранний диагенез по В. И. Осипову характеризуется дальними и ближними коагуляционными контактами, ему присуще свободное геостатическое уплотнение с пористостью 60–75%, естественной влажностью 45–95% ($W_e \geq W_L$), скрытотекучая консистенция, очень большой коэффициент сжимаемости (100–30 МПа⁻¹), а также ряд других параметров.

При переходе в стадию позднего диагенеза дальние и ближние коагуляционные контакты сменяют только ближние, пористость и естественная влажность снижаются до значений, соответственно, 35–45% и 30–45% ($W_e \leq W_L$), а осадок переходит в текучее и мягкопластичное состояние.

Как видно из приведенного выше описания первого этапа литогенеза, различными авторами рассматривался только тот интервал осадка, к которому применимы лабораторные методы исследования физико-механических свойств.

Необходимо подчеркнуть, что с момента рассмотрения процесса литогенеза в фокусе объективных измеряемых параметров среды (типа ми-

кстроения, типа контактов и, самое главное, физико-механических характеристик вещества) произошел кардинальный сдвиг в понимании динамики и направленности изменения геологической среды, вследствие чего осадочный процесс превратился из во многом описательного (за исключением гранулометрического состава, линейных параметров и геохимических характеристик) в цифровой.

Таким образом, учитывая все вышеизложенное, показатель трансформации осадка должен включать в себя математическое выраженное изменение *соотношение компонент* на всем отрезке образования осадка от взвеси до донного

грунта (горной породы). В нашем случае этими компонентами должны выступать жидкая и биотическая составляющие. Если биотическая компонента вполне определена, то жидкую компоненту целесообразно разделить на две составляющие: общее (суммарное) содержание воды в осадке, и то количество воды, которое непосредственно участвует в физико-химических реакциях с твердой фазой и придает глинистому грунту фундаментальное свойство — пластичность.

Итак, индекс трансформации осадка выступает неким формализованным выражением процесса седиментации и раннего диагенеза.

Таблица. Физико-химические свойства илов

Глубина отбора, см	W_e , %	W_L , %	$C_{орг}$, %	$I_{мо}$
Белое море, Кандалакшский залив, бухта Никольская				
-0.05–0	539	110	11.06	-3.5
0–0.05	235	109	8.89	-1.6
0.05–1	205	102	6.85	-2.2
1–2	181	90	6.47	-2.2
2–3	170	90	5.63	-2.5
3–4	166	91	5.94	-2.1
4–5	144	85	5.81	-1.7
5–8	147	86	5.73	-1.9
9–11	141	85	5.53	-1.8
14–16	145	89	5.61	-1.8
16–19	137	92	5.68	-1.4
19–21	139	87	5.32	-1.8
21–24	124	91	5.3	-1.7
24–26	123	94	5.22	-1.1
26–29	118	93	5.18	-0.9
29–30	116	92	5.06	-0.9
34–35	112	95	4.86	-0.7
35–36	98	98	4.79	0
36–39	96	95	4.83	0
40–42	93	93	2.98	0
43–45	90	93	2.85	0.3
Море Лаптевых, бухта Моржовая [4]				
0–3	103	48	3.3	-5.1
3–7	74	40	3.1	-3.5
8–12	47	31	2.8	-2.0
13–16	22	23	1.9	0.3
18–22	19	21	1.8	0.6

Примечание. Влажность: W_e — естественная, W_L — верхнего предела пластичности, $C_{орг}$ — содержание органического углерода, $I_{мо}$ — индекс трансформации осадка.

В связи с этим для определения индекса трансформации были выбраны показатели состава *первого порядка*, определяемые одним прямым методом: естественная влажность осадка (W_e), влажность на границе текучести (W_L) и относительное содержание органического вещества ($C_{орг}$). В общем виде индекс трансформации осадка можно записать так:

$$I_{mo} = (W_L - W_e) / C_{орг}^2,$$

где I_{mo} — индекс трансформации осадка,

W_L — влажность на границе текучести, %,

W_e — естественная влажность осадка, %,

$C_{орг}$ — относительное содержание органического вещества, %.

При использовании данного коэффициента все множество состояний донного осадка разбивается на интервалы значений от $-n$ до $+n$ с переходом через 0. Отрицательные значения I_{mo} относятся к области осадка (ила), положительные I_{mo} — к области породы (глины).

Следует подчеркнуть, что введение и использование данного индекса не противоречит предыдущим геологическим, литологическим и грунтоведческим построениям, основанным на разных критериях и принципах, для обоснования и выделения стадий формирования осадочных пород. Скорее, это попытка создать объединенный литологический и грунтоведческий критерий для выделения стадий на основании физико-химических свойств осадка (соотношение W_e , W_L и $C_{орг}$).

В качестве примера приведем результирующую таблицу, по рассматриваемым нами параметрами непрерывной секвенции донных глинистых осадков, отобранных на шельфе разных морей Евразии.

Из табличных примеров следует, что граница раздела в системе ил—глина при пороговых значениях $W_e = W_L$ и $C_{орг} \approx 3\%$ по вышеприведенному индексу может находиться на разной глубине.

Числовые значения основных физико-химических параметров (W_e , W_L и $C_{орг}$) в системе наилок—осадок («осадочный туман» [3]) могут быть различны и зависеть от конкретных геолого-геоморфологических условий седиментации определенной природно-климатической зоны.

Очевидно, что предлагаемый к использованию «индекс трансформации осадка» не может решить проблему безусловной градации непре-

рывной секвенции современных морских отложений, но есть основания надеяться, что он все же поможет седиментологам и морским геологам достаточно точно разделять интересующую их систему. Появляется возможность, используя понятные и простые в определении показатели состава донного осадка, дополнить морские геологические исследования физическим смыслом, что в свою очередь будет способствовать решению ряда стоящих перед ними вопросов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беляев Н. А.* Органическое вещество и углеводородные маркеры Белого моря. Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М., ИО РАН, 2015, 26 с.
2. *Здобин Д. Ю., Семенова Л. К.* О гранулометрическом анализе грунтов: классические и лазерные методы. *Геоэкология* № 6, 2011, с. 560–567.
3. *Здобин Д. Ю.* Стадийность образования глинистых грунтов в присутствии органического вещества // *Геоэкология*, 2013, № 3, С. 259–263.
4. *Здобин Д. Ю.* О возможном универсальном показателе трансформации осадка. Труды XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии, М., ГЕОС, 2015, т. III, с. 37–42.
5. *Козлов С. А.* Формирование структуры и инженерно-геологических свойств глубоководных отложений Тихого океана // Труды НИИГА — ВНИИОкеангеология. Т. 198. СПб., 2003.
6. *Кравчишина М. Д.* Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009, 264 с.
7. *Леин А. Ю., Маккавеев П. Н., Саввичев А. С. и др.* Процессы трансформации взвеси в осадок в Карском море в сентябре 2011 г. // *Геология морей и океанов. Труды XX Международной научной конференции по морской геологии*, М., ГЕОС, 2013, т. I, с. 98–99.
8. *Немировская И. А.* Трансформация углеводов разного генезиса в процессе седиментации. В кн. «Проблемы литологии, геохимии, рудогенеза осадочного процесса». т. 2, М., ГЕОС, 2000, с. 78–84.
9. *Осипов В. И., Соколов В. Н.* Глины и их свойства. М., ГЕОС, 2013, 575 с.
10. *Осипов В. И.* Природа прочностных и деформационных свойств глинистых пород. М., МГУ, 1979, 232 с.
11. *Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А.* Микроструктура глинистых пород, М., Недра, 1989, 211 с.
12. *Романкевич Е. А.* Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1977, 256 с.
13. *Романкевич Е. А., Ветров А. А.* Цикл углерода в арктических морях России. М., Наука, 2001, 302 с.
14. *Рухин Л. Б.* Основы литологии. Л., Недра, 1969, 703 с.
15. *Свальнов В. Н., Алексеева Т. Н.* Основные характеристики океанских глубоководных осадков на стадии седиментогенеза. Ленинградская школа литологии. Т. 1, с. 137–138, СПб., 2012.

16. Шников А. Б. Некоторые аспекты изучения и оценки инженерно-геологических свойств морских илов // Инженерная геология, 1980, N 6, с. 50–60.
17. Шников А. Б. Инженерно-геологическая классификация илов // Инженерная геология, 1986, N 3, с. 23–32.
18. Янакурт О. В. Литология. Разделы теории. М., МАКС Пресс, 2013, 216 с.
19. The global biogeochemical Sulfur Cycle / Eds. Ivanov M. V., Freney J. R. Chichester: Scope 19. Wiley, 1983. 511 p.
20. Andreas Brand et al. Microsensor for in situ flow measurements in benthic boundary layers at submillimeter resolution with extremely slow flow. American Society of Limnology and Oceanography: Methods 5, 2007, 185–191 p.
21. Boudreau B. P. Diagenetic models and their implementation: modelling transport and reactions in aquatic sediments // Springer. Berlin. Heidelberg. NY. 1997. 414 p.
22. Danielsson et al. Resuspension patterns in the Baltic Proper Journal of Sea Research. 2007. V. 57. P. 257–269.
23. Darioush G. Barhaghi. A Study of Turbulent Natural Convection Boundary Layers Using Large-Eddy Simulation. Chalmers University of technology. Goteborg, Sweden, 2007 111 p.
24. McCave I. N. Particulate size spectra, behavior, and origin of nepheloid layers over the Nova Scotian Continental Rise // J. Geoph. Res. 1983. V. 88. № C12. P. 7647–7666.
25. Muller C., Stein R. Grain size distribution and clay mineral composition in surface sediments and suspended matter of the Ob and Yenisei rivers // Ber. Polar for sch. 1999. V. 300. P. 179–187.
26. Nachman R. J. Unusual predominance of Even Carbon Hydrocarbons in an Antarctic Food Chain // Lipids. 1985. V. 20. № 9. P. 629–633.
27. Stein R. Arctic Ocean sediments processes, proxies and paleoenvironment. Amsterdam: Springer, 2008. 592 p.

INDEX TRANSFORMATION OF THE SEDIMENT

© 2019 **D. Yu. Zdobin**

Saint Petersburg state University, St. Petersburg, Russia
e-mail: trestgrii lab@mail.ru

Received October 03, 2018

Revised version received October 03, 2018

After revision February 05, 2019

Discusses the results of long term monitoring studies of physics-chemical properties of Holocene silts of the Kandalaksha Bay of the White Sea. On the basis of comprehensive analysis of a ratio of values natural moisture content (W_e), humidity upper limit of plasticity (W_L) and percentage of organic matter (C_{org}) at the depth of a continuous sequence of marine organo-mineral soils, the conclusion about the possibility of separation of sediment on physics-chemical parameters by introducing the index transformation of sediment — To. Analysis of the distribution of sediment properties with depth, carried out in other waters (the Laptev sea, South China sea) suggests the universality of this indicator. Necessity of the division of a single natural system "sediment–silt–clay fluid" boundary "sedimentation–diagenesis" ("silt clay–clay fluid") $W_e \geq W_L$ and the $C_{org} \geq 3\%$.

Keywords: silt clay, organic matter, physics-chemical properties, stages of formation of clay soils, universal index transformation of the sediment