

УДК 551.463.8, 549.08, 552.52

МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ ВЗВЕСИ БЕЛОГО МОРЯ

© 2014 г. М. Д. Кравчишина, О. М. Дара

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: kravchishina@ocean.ru, olgadara@mail.ru

Поступила в редакцию 09.08.2012 г., после доработки 11.02.2013 г.

Проведено исследование минерального состава взвеси водной толщи Белого моря. Выполнено сопоставление с минеральным составом речных взвесей водосборного бассейна моря, в том числе, одного из главных источников терригенного взвешенного вещества – р. Северной Двины. Подобные работы сопряжены со многими техническими трудностями, что замедляет развитие этих исследований. Данные литературы по вопросу изучения минерального состава взвесей крайне ограничены. С помощью метода рентгеновской порошковой дифрактометрии нам удалось изучить валовый минеральный состав взвешенного вещества и состав ее глинистой фракции.

DOI: 10.7868/S0030157414020129

ВВЕДЕНИЕ

Взвешенное вещество является исходным материалом для формирования донных осадков. Минеральный состав взвеси – один из важных индикаторов происхождения взвешенного осадочного материала, дальности и векторов его переноса. Он определяется поставкой материала не только из водосборного бассейна реками, но также из взаимодействующих геосфер (атмосфера, криосфера, биосфера и др.) [17, 18, 20].

Минералогические исследования взвешенного вещества затруднены в силу целого ряда технических проблем, а работы по этой проблеме немногочисленны. Минеральный состав взвеси ряда Арктических морей (Баренцева, Карского и Лаптевых) был изучен в работах Лисицына [19], Серовой, Горбуновой [30], Мурдмаа и др. [23], Русакова и др. [29], Политовой [26], Лукашина [37], Müller и Stein [38]. Минеральный состав взвеси р. Северной Двины – основного поставщика терригенного осадочного материала в Белое море – рассмотрен в статье Кравчишиной и др. [10].

Первая и единственная работа о глинистых минералах во взвеси прибрежной зоны Белого моря принадлежит Кривоносковой и др. [12].

Минералогические исследования в Белом море проводились только для изучения минерального состава донных осадков (особенно состава глинистых минералов) Калиненко и др. [6, 7], Невеским и др. [24], Павлидисом и др. [25], Ратеевым и др. [27], Saukel et al. [39], речных взвесей и аллювия – Кривоносковой и др. [12], Калиненко и др. [7]. Таким образом, впервые за последние 40 лет авторами предпринята попытка исследования минерального состава не донных осадков, а морской взвеси водной толщи этой акватории.

Комплексное исследование взвеси Белого моря проводится нами (начиная с 2000 г.) в рамках проекта “Система Белого моря” под руководством академика А.П. Лисицына [20].

РАЙОН РАБОТ И ОБЩИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЗВЕСИ

Белое море – целиком шельфовое море, занимающее окраинную материковую депрессию, которая располагается на рубеже основных мегаструктур Восточно-Европейской платформы: Балтийского щита и Русской плиты. Четвертичные образования и четвертичные породы, их мощность и распространение на водосборном бассейне моря рассмотрены в работах Невеского и др. [24], Спиридонова и др. [33], “Система Белого моря” [31].

Общие закономерности распределения взвеси в поверхностных водах Белого моря были намечены в различных публикациях [21, 22, 24] и характерны для многих внутренних и шельфовых морей Российской Арктики.

По нашим данным средняя концентрация взвеси в поверхностных водах Белого моря за пределами маргинальных фильтров рек летом приблизительно составляет 1.0 мг/л [11]. По данным 10 лет наблюдений летом она варьирует от 0.5 до 1.1 мг/л, повышаясь, как правило, в июне и понижаясь в августе. Концентрация взвеси более 1.0 мг/л наблюдаются, как правило, в сравнительно узкой (обычно до 20 км) прибрежной полосе, где формируется сложная структура взвесенесущих вдольбереговых потоков [1, 8]. Содержание взвешенного вещества в этих районах постоянно меняется в зависимости от гидрологической ситуации (штор-

мовое волнение, приливные течения и др.) и обусловлено физико-химическими и биологическими процессами, происходящими в устьях рек (явление маргинального фильтра) [19].

С удалением от побережий в пелагиаль значение концентрации взвеси становится все более постоянным, а в количественном отношении оно уменьшается в 5–10 и более раз. В центральной части моря концентрации взвеси обычно колеблются от 0.3 до 0.8 мг/л.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Пробы взвеси для изучения минерального состава отбирались тремя способами: фильтрационным, сепарационным и декантацией.

Карта-схема мест отбора проб воды дана на рис. 1а, 1б (всего 42 пробы взвеси). Элементный состав части этих проб взвеси из дельты р. Северной Двины приведен в статье Шевченко и др. [34].

Фильтрация взвеси проводилась под вакуумом 0.4 атм с помощью фильтрационных воронок фирмы “Сарториус” (“Sartorius”) через мембранные ядерные поликарбонатные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0.4 мкм производства ОИЯИ (г. Дубна).

Отбор проб воды с различных горизонтов проводился винипластовыми батометрами (или пластиковым ведром с поверхности по ходу судна) на основе предварительного многопараметрического гидрофизического зондирования. Объем отфильтрованной воды составлял от 1 до 5–7 л (в зависимости от количества взвеси).

Сепарация взвеси на ходу судна выполнялась тарельчатыми и барабанными сепараторами [16, 18]. Декантация проб взвеси проводилась в пластиковых баках из объемов воды 30–50 л в областях маргинальных фильтров рек.

Для исследования минерального состава взвешенного вещества был применен метод рентгеновской порошковой дифрактометрии. Предварительное оптическое и электронно-микроскопическое исследование образцов показало, что основная масса материала представлена детритом (раковинки, панцири планктонных организмов и их обломки, остатки наземной растительности, органо-минеральные агрегаты), целыми клетками фитопланктона, пылью, спорами. Исследуемый материал – это смесь отдельных минеральных зерен, агрегатов, чешуйчатых образований слоистых силикатов с рентгеноаморфной массой.

Минеральное вещество, собранное на фильтрах, в основном, состоит из частиц пелитовой размерности [9]. Количество его зависит от сезона года, места и глубины отбора пробы. Практически всегда кристаллической фазы материала недостаточно для рентгенографического количественного анализа. Отфильтрованная из воды

взвесь обычно прочно прикреплена к фильтру, дающему на рентгенограмме мощное гало в области 16° – 30° θ . Исследуемый материал смывался с фильтров в агатовую ступку, дотирался пестиком и наносился в виде суспензии на подложку из кварцевого стекла. Такая подготовка проб приводит к дополнительным неизбежным потерям тонкого материала. Количество и вещественный состав материала, полученного из морской воды, далеко не всегда позволяет выделить тонкодисперсную (пелитовую) фракцию для детального исследования.

Несмотря на эти сложности, метод рентгеновской порошковой дифрактометрии, является единственным методом, способным расшифровать состав столь сложного, многофазного объекта.

Для изучения минерального состава использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-2.0 с $\text{CuK}\alpha$ -излучением, графитовым монохроматором, $U = 40 \text{ kV}$, $I = 40 \text{ mA}$, работающим в непрерывном режиме со скоростью 1 градус/мин. Образцы снимались в интервале углов от 2.5° до 70° 2θ с использованием щелевой программы: щели Соллера, на трубке 1 мм и 0.1 мм перед образцом и на счетчике 0.25 мм при комнатной температуре.

Регистрация спектров и их первичная обработка осуществлялись с помощью “Системы автоматизации рентгеновских дифрактометров “ДРОН”.

В зависимости от количества вещества проводился либо только валовый полуколичественный анализ пробы, либо дополнительно выполнялся анализ глинистых минералов (в тех случаях, когда удавалось выделить пелитовую фракцию). В первом случае анализ проводили с использованием корундовых чисел. Во втором – для анализа минерального состава глин были использованы широко распространенные приемы изучения глинистых минералов, описанные в сборнике под редакцией Брауна [28]. Ориентированные воздушно-сухие образцы готовили из водной суспензии пелитовой фракции, отделенной от исходного образца в дистиллированной воде. Далее, при необходимости, применялась термическая обработка (для идентификации хлорита) и насыщение пробы этиленгликолем (для идентификации минералов группы смектита и смешанно-слоистых образований с разбухающими слоями). Соотношение глинистых минералов рассчитывалось по рентгенограммам образцов, насыщенных этиленгликолем по методике Biscaye [36].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Взвешенное вещество Белого моря сильно обогащено рентгеноаморфным материалом (скелеты диатомовых и другие планктонные микро-

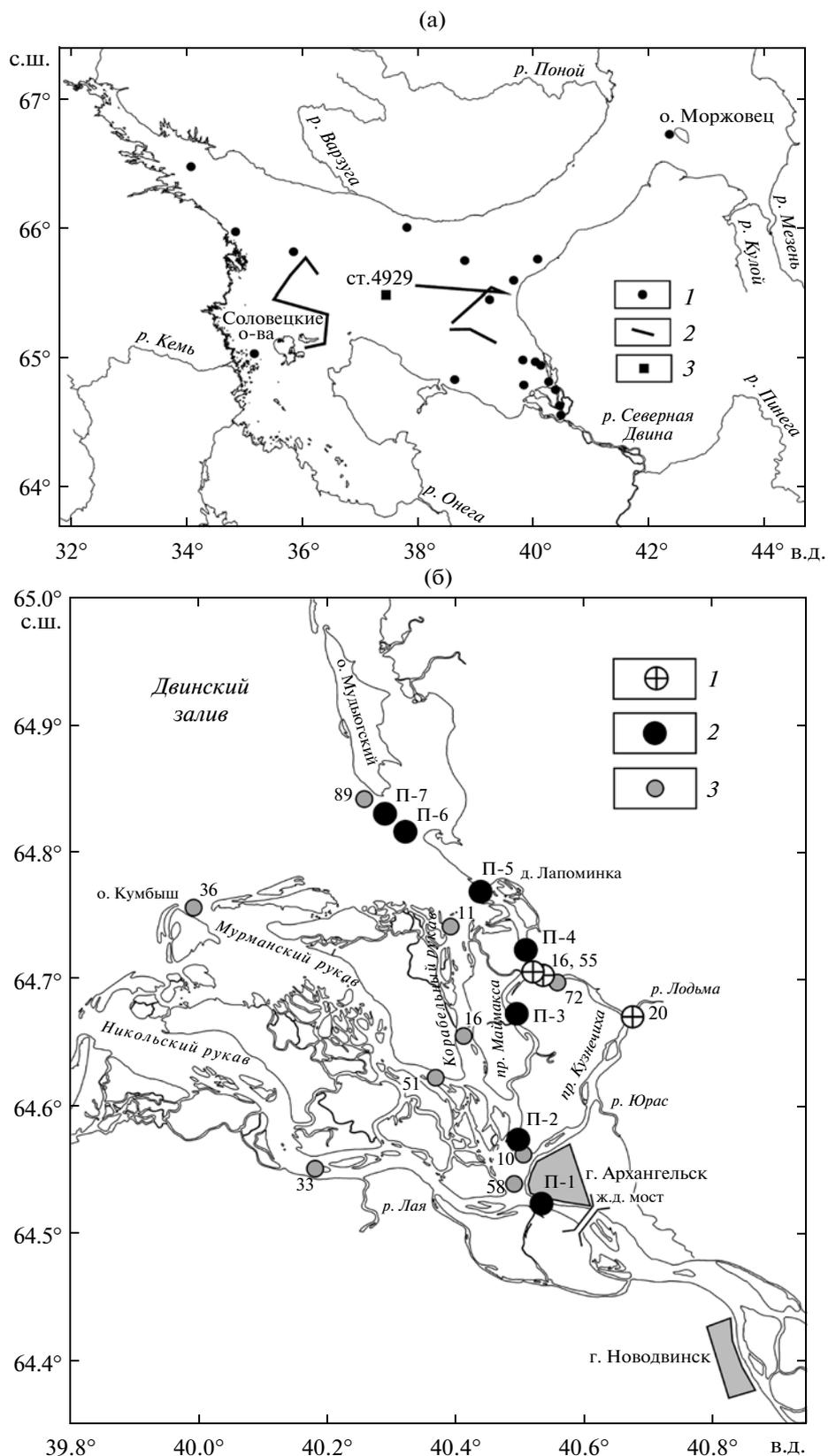


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб взвеси для изучения минерального состава: (а) в Белом море: 1 – пробы собраны методом фильтрации (август 2007 г., июнь 2008 г.), 2 – пробы собраны с помощью сепаратора (август 2006 г.), 3 – положение ст. 4929; (б) в дельте р. Северной Двины методом декантации: 1 – в мае 2006 г., 2 – в августе 2006 г., 3 – в мае 2004 г.

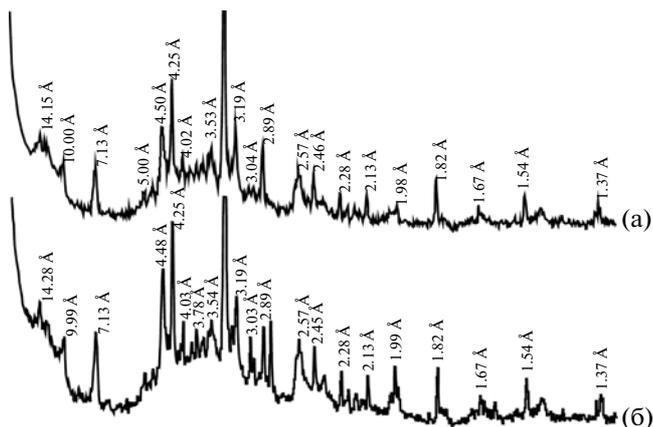


Рис. 2. Типичные рентгеновские дифрактограммы проб взвеси, отобранных методом декантации в устье р. Северной Двины, 80-й рейс НИС “Профессор Штокман” (август 2006 г.): (а) – ст. П-5; (б) – ст. П-6. Положение станций см. на рис. 1б.

водоросли, детрит). Наличие рентгеноаморфного вещества и малые навески взвеси, выделенной с помощью фильтрации, затрудняют также определение соотношений кристаллических минеральных фаз. Исследование сепарационных проб, где удастся получить большие навески вещества, к сожалению, не дают полноценной картины минерального состава. Тонкопелитовая (преимущественно глинистая) часть взвеси теряется при сепарации морской воды, в результате чего кристаллическая фаза вещества обогащается кварцем. В сепарационных пробах взвеси наиболее полно представлены минералы песчано-алевритовых фракций.

О составе и содержании минералов наиболее полно можно судить по декантированным (осажденным) пробам взвеси. Получать взвешенное вещество в необходимых для анализа количествах удастся лишь в пробах воды с высокими содержаниями взвеси (маргинальные фильтры довольно узкой прибрежной зоны моря) (рис. 1б). Пример дифрактограммы таких проб представлен на рис. 2. Чаще всего, этот метод используют для изучения поставки терригенного вещества с речным стоком.

В табл. 1 представлены некоторые из полученных результатов.

В процессе седиментации и трансформации вещества в водной толще взвесь, как правило, освобождается от части рентгеноаморфного вещества (разложение биогенной части) и донные осадки, таким образом, обогащаются кристаллическим материалом.

В пробах донных осадков глинистое вещество хорошо отделяется от более грубых фракций в процессе подготовки проб. Это позволяет дать качественную и количественную оценку тонкопелитовой фракции осадков. На рис. 3 приведены

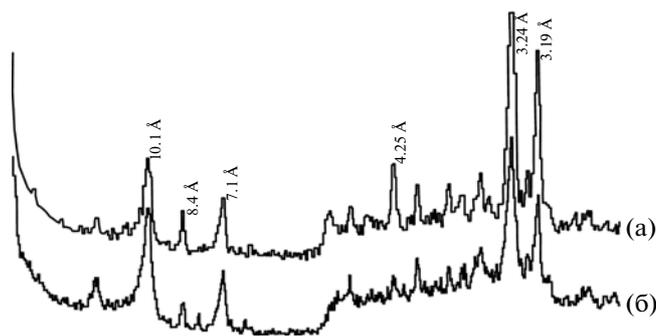


Рис. 3. Типичные рентгеновские дифрактограммы пелитовых фракций поверхностного слоя (0–5 см) донных осадков Белого моря (ст. 4929, 65°27.03' с.ш. и 37°23.02' в.д., глубина моря 150 м, 55-й рейс НИС “Профессор Штокман”): (а) – пелитовая фракция <0.01 мм; (б) – тонкопелитовая (субколлоидная) фракция <0.001 мм. Положение ст. 4929 см. на рис. 1а.

дифрактограммы таких образцов (фракции <0.01 и <0.001 мм верхнего слоя донных осадков Белого моря). Видно, что тонкопелитовая фракция (<0.001 мм), обычно состоящая из слоистых силикатов (иллит 10.1 Å, каолинит 7.1 Å, хлорит 14.1 Å, 7.1 Å, смектит 12–15 Å), обогащена также тонкодисперсными кварцем (4.25 Å), амфиболом (8.4 Å), полевыми шпатами (КПШ 3.24 Å, альбит 3.19 Å). В пелитовой фракции (<0.01 мм) содержание этих обломочных минералов заметно выше, чем в субколлоидной фракции (<0.001 мм).

Взвешенное вещество Белого моря также обогащено кварцем и полевыми шпатами. Среди тонкодисперсных минералов взвеси обычны кварц, калиевые полевые шпаты, плагиоклаз (альбит), амфибол (роговая обманка, тремолит), пироксен, доломит и глинистые минералы – иллит, каолинит, хлорит и смектит. Кроме того, во взвеси Белого моря обнаружены кальцит и арагонит. Смешанно-слоистые глинистые минералы обычно составляют небольшую примесь в пелитовой фракции взвеси. Как правило, это продукты деградации слюд – неупорядоченные иллит-смектитовые образования с различным содержанием смектитовых пакетов.

В тонкопелитовой фракции донных осадков (<0.001 мм) ранее было установлено три типа упорядоченных образований: иллит-смектитовые, иллит-хлоритовые и слюда-вермикулитовые [7].

Нами обнаружен приблизительно одинаковый спектр минералов взвеси в открытых водах моря. В отличие от донных осадков, взвешенный материал более однообразный (усредненный). В процессе переноса соотношение основных групп минералов (как в крупных, так и в тонких фракциях) остается более или менее постоянным, четкой дифференциации минерального состава взвеси не наблюдается, что ранее было отмечено и дру-

Таблица 1. Минеральный состав (результаты РФА) проб взвеси (горизонт 0 м) устья р. Северной Двины, отобранных методом декантации в мае 2004 и 2006 гг. (СД-2004, СД-2006) и августе 2006 г. (ПШ-80), %

Экспедиция, рейс	Номер станции	Координаты		Глубина, м	Соленость воды, ‰	Сумма маглин	Кварц	Альбит	КПШ*	Доломит	Амфибол	Пироксен	Кальцит	Лётит	Пелитовая фракция <0.01 мм			
		с.ш.	в.д.												Иллит	Смектит	Каолинит	Хлорит
СД-2004	10	64°35.09'	40°29.92'	14	0.02	46	9	18	13	9	4	—	—	—	58	Следы	23	18
СД-2004	11	64°44.83'	40°23.08'	3.9	0.02	50	17	14	10	5	2	—	—	—	45	14	20	20
СД-2004	16	64°38.75'	40°24.56'	6	0.02	44	24	13	10	7	—	—	—	—	51	15	17	16
СД-2004	17	64°09.25'	41°54.85'	10	0.02	25	26	21	20	4	2	—	—	—	39	25	16	18
СД-2004	18	64°07.93'	41°51.40'	9	0.02	41	29	14	8	5	2	—	—	—	43	16	17	23
СД-2004	26	64°07.61'	41°53.95'	4.9	0.02	39	26	13	12	5	3	—	—	—	57	Следы	18	24
СД-2004	33	64°07.61'	41°53.95'	5	0.02	41	23	11	14	5	4	—	—	—	37	17	21	24
СД-2004	36	64°45.37'	39°59.46'	10	0.02	49	22	10	8	7	3	—	—	—	49	16	17	16
СД-2004	51	64°37.44'	40°22.60'	6	0.02	57	14	12	12	4	Следы	—	—	—	55	9	20	15
СД-2004	58	64°33.04'	40°29.31'	7.8	0.02	52	17	14	9	5	3	—	—	—	46	20	15	18
СД-2004	72	64°42.10'	40°32.16'	6.9	0.02	42	26	10	14	6	—	—	—	—	44	9	25	20
СД-2004	89	64°51.04'	40°16.08'	9	0.90	68	10	9	8	4	—	—	—	—	39	17	16	27
СД-2006	16	64°42.12'	40°32.03'	11	0.09	49	20	12	7	4	2	3	—	—	53	16	22	8
СД-2006	55	64°42.13'	40°32.20'	9	0.09	43	16	13	10	2	4	6	—	—	42	21	9	27
СД-2006	20	64°40.62'	40°39.60'	8	0.03	42	19	16	3	5	2	5	2	—	20	30	16	33
ПШ-80	П-1	64°31.97'	40°30.99'	11	0.02	49	17	7	4	5	4	5	2	4	—	—	—	—
ПШ-80	П-2	64°34.81'	40°29.82'	10	0.03	44	22	8	6	7	6	4	—	—	—	—	—	—
ПШ-80	П-3	64°41.38'	40°28.55'	12	0.04	54	18	6	2	3	6	4	—	2	—	—	—	—
ПШ-80	П-4	64°43.41'	40°30.46'	11	1.84	52	18	5	1	6	3	11	—	—	—	—	—	—
ПШ-80	П-5	64°46.39'	40°26.90'	12	5.04	41	17	8	5	8	5	4	5	4	—	—	—	—
ПШ-80	П-6	64°49.08'	40°19.78'	14	6.07	43	18	6	4	5	5	6	9	—	36	28	20	15
ПШ-80	П-7	64°49.80'	40°18.22'	13	9.67	43	19	6	5	6	5	5	7	—	—	—	—	—

* КПШ — калиевые полевые шпаты.

гими исследователями [30]. Вполне возможно, что это связано с недостаточной разрешающей способностью имеющихся технических средств.

По предварительным данным комплекс минералов морской и речной взвеси идентичен (табл. 1, 2). При этом наибольшее значение и особый интерес представляет исследование минеральных ассоциаций глин. Основной фон глинистых минералов взвеси Белого моря формирует терригенный сток р. Северной Двины, а также р. Онеги, р. Кеми и др. (табл. 2).

Подавляющая часть площади дна Белого моря занята осадками, в пелитовой фракции которых резко доминирует иллит [7]. Аналогичный состав глинистых минералов характерен для взвеси и верхнего слоя донных осадков некоторых других арктических морей [6, 15, 30, 38, 41].

Распределение глинистых минералов

1. Иллит. Наши результаты показывают, что главным глинистым минералом взвешенного вещества Белого моря, так же как и верхнего слоя донных осадков, является иллит. Он поступает с речным стоком, где его содержание достаточно велико как в речном аллювии, так и во взвеси (табл. 1, 2).

Четвертичные ледниковые отложения, распространённые в почвах и моренах водосбора Белого моря, поставляют во взвесь много иллита, а также хлорит. По данным Калиненко и др. [7], содержание иллита в ледниковых отложениях (фракция <0.001 мм) колеблется от 40 до 90%, а хлорита – от следовых количеств до 35%.

Согласно нашим данным, высокое содержание иллита как в пелитовой (<0.01 мм), так и в тонкопелитовой (или субколлоидной <0.001 мм) фракциях взвеси указывает на существование двух форм этого минерала: крупнодисперсной и тонкодисперсной, что обуславливает его повсеместное распространение. Поэтому в донных осадках иллит может представлять собой основу для ассоциаций глинистых минералов как с хлоритом, так и со смектитом.

В Белом море подавляющая часть площади дна занята осадками, в пелитовой фракции которых доминирует иллит [7], что подтверждают наши данные. В поверхностном слое донных осадков других арктических морей также удается выделить иллитовый пояс. Он простирается от Белого и Баренцева морей до моря Бофорта [6]. Этот пояс представляет собой сложное образование, так как включает в себя локальные минералогические провинции.

2. Смектит и смешанно-слоистые минералы. Практически во всех изученных нами пробах морской взвеси присутствует смектит и, реже, смешанно-слоистые образования иллит-смектит.

Количественное определение смектита во взвеси представляет наибольшую сложность. По данным Müller, Stein [38] во взвешенном веществе он содержится, как правило, в заметно большем количестве, чем в осадках.

Основным источником поставки смектита в морскую взвесь и затем в осадки является водосбор р. Северной Двины. В тонкопелитовой фракции (<0.001 мм) взвеси р. Северной Двины содержание смектита достигает 34%. Вероятно в процессе переноса вещества в водосборе и в море идет обогащение тонкопелитовой фракции (<0.001 мм) смектитом.

Присутствие значительного количества смектита в речной взвеси р. Северной Двины установлено и другими исследователями [7, 39].

Особенности распределения смектита в морской среде во многом связаны с его высокой дисперсностью и большим содержанием воды. Он способен дольше, чем другие глинистые минералы, удерживаться во взвешенном состоянии. Кроме того, дальний перенос этого минерала обеспечивается за счет селективного неосаждения в области маргинального фильтра (обусловлено емкостью катионного обмена). Результаты модельного эксперимента подтвердили большую миграционную способность модифицированных аналогов смектита и показали, что преимущественная его седиментация происходит в пределах солёности воды 1–7‰ [14].

Далеко не каждая речная система, питающая арктические моря, поставляет смектит. Это характерно для крупнейших равнинных рек большой протяженности, ориентированных по меридиану и пересекающих несколько климатических зон и специфических петрографических областей (например реки Обь, Енисей, Лена и др.). Значительная часть их водосборов находится далеко на юге, за пределами арктической зоны.

В осадках Белого моря смектит накапливается преимущественно в наиболее тонких илах на глубинах более 100 м [7]. По данным Saukel и др. [40] смектит, наряду с иллитом, в центральной части моря является одним из доминирующих среди глинистых минералов верхнего слоя донных осадков. Здесь его среднее содержание составляет 32.3% (для сравнения иллита – 38.4%). Так в срединной впадине Белого моря (Бассейн) формируется локальная смектитовая провинция иллитового пояса [6].

Минеральный фон глинистой фракции поверхностного слоя донных осадков Карского моря определяют иллит и смектит, а хлорит и каолинит находятся в подчиненном количестве [3, 35, 38].

В морях Белом, Баренцевом, Карском и Лаптевых наблюдаются участки обогащения осадков смектитом, где он является постоянным и естественным спутником иллита на фоне доминиру-

Таблица 2. Глинистые минералы (результаты РФА) декантированной и фильтрационной речной и прибрежной морской взвеси, а также аллювия рек бассейна Белого моря во фракции <0.001 мм (во фракции <0.002 мм в работе [39]), %

Станция, образец	Координаты с.ш., в.д.	Глубина, м	Иллит	Смектит	Каолинит	Хлорит	Смешанно-слоистые	Источник
Взвесь р. Северной Двины								
10	64°35.09' 40°29.92'	14.0	45	10	17	26		
11	64°44.83' 40°23.08'	3.9	50	19	16	14		
16	64°38.75' 40°24.56'	6.0	36	23	20	19		
17	64°09.25' 41°54.85'	10.0	42	30	15	11		
18	64°07.93' 41°51.40'	9.0	38	31	18	13		
26	64°07.61' 41°53.95'	4.9	45	12	21	22		[10]
33	64°07.61' 41°53.95'	5.0	34	34	18	14		
36	64°45.37' 39°59.46'	10.0	41	12	26	20		
51	64°37.44' 40°22.60'	6.0	48	24	13	14		
58	64°33.04' 40°29.31'	7.8	36	25	21	17		
72	64°42.10' 40°32.16'	6.9	37	17	25	20		
89	64°51.04' 40°16.08'	9.0	50	15	9	25		
33	64°32.99' 40°11.38'	5.0	21	45	17	16		[39]
58	64°33.04' 40°29.31'	7.8	24	48	11	16		
<i>N*</i>			45	++**	****	****		[32]
Обр. 4 (I-1)			45	35	10	10	Следы	
Обр. 6 (I-1)			45	30	15	5	5	[7]
Обр. 7 (I-1)			45	30	15	10	Следы	
Взвесь р. Кулоя								
158	Устье	Пов-ть	40	30	15	5		[12]
Взвесь р. Мезени								
30	Устье	Пов-ть	35	35	15	10		
31	Устье	Дно	35	30	25	Следы		
35		Пов-ть	35	30	20	15		
34		Дно	45	25	15	5	Следы	[12]
42	У поселка Каменка	Пов-ть	35	30	15	5		
45		Дно	30	40	15	5		
Обр. 8 (II-3)			55	20	20	5		[7]
Взвесь р. Онеги								
<i>N</i>			50	+	+	++		[32]
354	Устье	Пов-ть	45	10	25	10		[12]
Аллювий р. Мезени								
Песок с гравием			60	15		25		[7]
Аллювий р. Шойны								
Песок			50	10		40		[7]

Таблица 2. Окончание

Станция, образец	Координаты с.ш., в.д.	Глубина, м	Иллит	Смектит	Каолинит	Хлорит	Смешанно-слоистые	Источник
Аллювий р. Онеги								
Песок с гравием			60	15		25		[7]
100	63°57.31' 37°57.85'	3.9	45.0	9.7	21.6	23.7		[39]
101	63°56.99' 37°56.05'	2.7	54.9	7.0	16.6	21.6		
Аллювий р. Кеми								
105	64°58.68' 34°47.10'	3.1	72.8	4.4	7.0	15.8		[39]
106	64°57.80' 34°44.66'	1.7	81.5	2.5	3.9	12.0		
107	64°58.12' 34°45.87'	1.1	81.2	5.0	5.3	8.6		
108	64°57.75' 34°48.07'	3.5	72.7	4.5	6.2	16.5		
109	64°58.23' 34°47.97'	4.0	72.7	2.3	5.9	19.1		
110	64°57.70' 34°49.05'	0.5	81.5	4.6	3.2	10.7		
Прибрежная морская взвесь								
84	Канинский берег	Пов-ть	45	25	15	5		
88		Дно	40	25	20	5		
103		Пов-ть	30	40	20	5		
104		Дно	40	30	20	Следы		
134		Пов-ть	30	30	20	5		
65		Пов-ть	40	20	15	10	5	
580		Мезенский залив	Дно	30	30	15	Следы	
256	Пов-ть		35	25	25	5	5	
261	Пов-ть		40	30	15	5		
247	Пов-ть		50	10	20	10		
248	Дно		40	35	20	Следы		
15	Пов-ть		35	35	20	Следы	5	
244	Дно	45	15	20	Следы			
225	Вершина Мезенского залива	Пов-ть	40	20	20	5	Следы	[12]
226		Дно	40	25	15	5		
233		Пов-ть	40	20	20	10		
230		Пов-ть	35	30	20	5	Следы	
229		Дно	35	30	25	Следы		
399	Онежский берег	Пов-ть	65	Следы	25	Следы		
392		Дно	60	10	20	Следы		
360		Дно	55	15	20	Следы	5	
553	Вершина Двинского залива	Пов-ть	45	25	15	5		
462		Дно	30	30	20	Следы	5	
468		Дно	35	30	15	Следы	Следы	

N* – в источнике дана обобщенная характеристика для взвеси указанных рек без уточнения количества проб.

++ ** – означает преобладающее содержание в сравнении с другими минералами.

+*** – в источнике указано наличие этого минерала во взвеси рек, но не указано содержание.

ющей хлорит-иллитовой ассоциации глинистых минералов [6].

3. Хлорит и каолинит. В несколько меньших количествах, чем иллит, во взвеси, так же как и в верхнем слое донных осадков, содержится хлорит и каолинит (табл. 1, 2). Каолинит поступает преимущественно с речным стоком из южных частей водосборного бассейна в тонкодисперсной форме и более типичен для речной взвеси, чем для аллювия. Хлорит, наоборот, представлен относительно крупнопластинчатой инертной формой, тяготеющей к грубым обломочным компонентам аллювия [7].

Тонкодисперсные обломочные минералы

Среди обломочных минералов в морской взвеси (по данным метода рентгеновской порошковой дифрактометрии) повсеместно преобладает тонкодисперсный кварц, иногда до 50%. Содержание полевых шпатов значительно меньше. В речной взвеси устьевой области Северной Двины соотношение кварц/полевые шпаты колеблется от 0.3 до 3, составляя в среднем 1.5 (для 20 проб). Для сравнения, аналогичное соотношение во взвеси р. Лены было почти постоянным и составляло 2–2.3 [30].

Среди карбонатных минералов в сравнительно больших количествах (до 5–6%) нами обнаружен доломит, как в речной, так и в морской взвеси. Это один из наиболее устойчивых к выветриванию минералов. Во взвесь он попадает, вероятно, в результате размыва и переотложения исходного материала морены. Красноцветные карбонатные суглинистые породы занимают небольшие ареалы распространения на водосборе Белого моря и приурочены, как правило, к речной системе Северной Двины, Мезени, Пезы, Кулоя [4]. Эти породы являются важным источником карбонатного материала в море. Дополнительным источником доломита могут служить дочетвертичные осадочные породы северной части Русской плиты [2].

Другие карбонатные породы – кальцит и арагонит – в морской взвеси имеют подчиненное значение. Их содержание составляет лишь первые проценты, либо вовсе не определяются.

Практически во всех изученных пробах морской взвеси нами установлены амфиболы (роговая обманка, тремолит). Роговая обманка – один из наиболее распространенных минералов морены, где ее содержание может колебаться от 17 до 63% [13]. Эти минералы являются наиболее распространенными в тяжелой подфракции крупноалевритовой фракции поверхностного слоя донных осадков (среднее содержание 55% для $n = 70$) [5].

В отдельных пробах взвеси обнаружен гранат. Он также широко представлен в моренных отложениях водосбора Белого моря, где его содержа-

ние колеблется от 5 до 27%. Гранаты, главным образом алмадин, составляют значительную часть (12–23%) среди минералов тяжелой подфракции поверхностного слоя донных осадков [5].

Пироксены обычно присутствуют, как в морской, так и в речной взвеси (табл. 1, 2). Было установлено, что минералы группы пироксенов (авгит, гиперстен) широко распространены в поверхностном слое осадков. Их содержание обычно не превышает 10% [5].

Среди окисных рудных минералов во взвешенном веществе Двинского залива нами часто диагностируется гётит (2–4%).

В пробах морской взвеси часто встречается гипс, который может поступать в результате размыва почв, сформированных на дочетвертичных породах – гипсах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Взвешенное вещество – это тонкодисперсный многофазный (смесь отдельных минеральных зерен, агрегатов, чешуйчатых образований слоистых силикатов с рентгеноаморфной массой) и очень сложный объект для изучения минерального состава. Метод рентгеновской порошковой дифрактометрии остается единственным методом способным расшифровать состав взвеси. Проблемы, возникающие при выделении частиц взвеси из морской воды и при проведении процедуры анализа (малые навески вещества, которые удается собрать методом фильтрации, потери тонкодисперсной части взвешенных частиц при сепарации, часто невозможность декантации из морской воды, потери тонкопелитовых частиц при пробоподготовке к минеральному анализу, большое количество рентгеноаморфного вещества и др.) не позволяют проводить массовые исследования минерального состава кристаллической фазы в пробах взвешенного вещества.

Таким образом, в силу описанных выше технических сложностей изучения взвеси, на основании наших и обобщенных данных литературы, полученных методом рентгеновской порошковой дифрактометрии, на сегодняшний день можно дать лишь самую общую характеристику минерального состава взвешенного вещества Белого моря. За последние 40 лет это первая попытка подобного исследования взвеси.

1. Согласно полученным нами данным, доля глинистых минералов во взвешенном веществе составляет от 40% и выше. То есть кристаллическая фаза взвешенных в воде частиц почти наполовину состоит из глинистых минералов. Среди них первостепенная роль принадлежит иллиту (35–57% от суммы глин во фракции <0.01 мм). Высокое содержание иллита обнаруживается как

в пелитовой, так и в субколлоидной фракциях взвеси.

В сравнительно больших количествах присутствует смектит (8–30%), который обладает наибольшей дисперсностью и тяготеет к субколлоидной (<0.001 мм) фракции взвеси. Содержание хлорита и каолинита, как правило, колеблется от 15 до 27%. Смешанно-слоистые минералы обычно составляют лишь небольшую примесь во взвеси: от следовых количеств до 5%.

2. Схожий состав глинистых минералов взвеси характерен и для других арктических морей России (например, Карское, Лаптевых), подверженных влиянию крупных равнинных рек, пересекающих несколько природных зон.

3. Тонкодисперсная обломочная часть минералов присутствует во взвеси повсеместно, как в прибрежных, так и в открытых частях моря и в довольно значительных количествах. Среди них кварц и полевые шпаты создают основной (до 50%) фон (причем кварц несколько преобладает). Мельчайшие обломки этих минералов достигают открытых частей моря, обогащая в процессе седиментации пелитовую фракцию илов. Это явление указывает на то, что в динамической системе Белого моря взвешенное вещество не проходит полную механическую сепарацию.

Характерно относительно высокое содержание доломита (около 5%), что определяется соответствующим составом пород на водосборном бассейне Белого моря и устойчивостью этого минерала к разрушению.

Акцессорные тонкодисперсные минералы во взвеси обычно представлены амфиболами, пироксенами и гранатами. Установление их процентного соотношения затруднено в силу приведенных выше причин.

4. Для более детального изучения взвеси требуются более значительные количества осадочного вещества, а также выделение фракций <0.01 и <0.001 мм.

Авторы признательны академику А.П. Лисицыну за научное руководство и ценные замечания, В.П. Шевченко, А.Ю. Леин за поддержку и внимание к работе, А.Н. Новигатскому, А.С. Филиппову, А.А. Ключиткину, Н.В. Политовой и Л.А. Гайворонской за помощь в сборе материала.

Исследования поддержаны грантами РФФИ № 11-05-00087-а, 12-05-00210-а и № 12-05-91055-НЦНИ_а, программой фундаментальных исследований ОНЗ РАН № 5 (“Наночастицы: условия образования, методы анализа и извлечения из минерального сырья”), программой № 23 фундаментальных исследований Президиума РАН (“Трансевропейский меридиональный морской эколого-геохимический разрез), грантом Президента РФ № НШ-2493.2014.5, проектом Минобрнауки РФ (Соглашение № 8767).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А. Динамика твердого вещества в шельфовой зоне. Л.: Гидрометеоздат, 1990. 271 с.
2. Геология СССР. Архангельская, Вологодская области и Коми АССР. Ч. 1. Геологическое описание. Т. 2. М.: Гос. научно-технич. изд-во лит. по геологии и охране недр, 1963. 1080 с.
3. Горбунова З.Н. Высокодисперсные минералы в осадках Карского моря // Океанология. 1997. Т. 37. № 5. С. 785–788.
4. Горячкин С.В., Лесовая С.Н. Почвообразующие породы и почвы // Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря / Отв. ред. Лисицын А.П.. М.: Научный мир, 2010. С. 148–155.
5. Гусакова А.И., Дара О.М. Минеральный состав современных донных осадков Белого моря // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 249–258.
6. Калинин В.В. Глинистые минералы в осадках Арктических морей // Литология и полезные ископаемые. 2001. № 4. С. 418–429.
7. Калинин В.В., Ратеев М.А., Хеиров М.Б., Шевченко А.Я. Глинистые минералы в осадках Белого моря // Литология и полезные ископаемые. 1974. № 4. С. 10–23.
8. Косьян Р.Д., Пыхов Н.В. Гидрогенные перемещения осадков в береговой зоне моря. М.: Наука, 1991. 280 с.
9. Кравчишина М.Д. Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М.: Научный мир, 2009. 264 с.
10. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С. и др. Вещественный состав водной взвеси устья р. Северной Двины (Белое море) в период весеннего половодья // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 396–416.
11. Кравчишина М.Д., Лисицын А.П., Ключиткин А.А. и др. Распределение массовых концентраций взвеси (метод фильтрации) в поверхностном слое // Система Белого моря. Т. 3. М.: Научный мир, 2013. С. 76–88.
12. Кривоносова Н.М., Медведев В.С., Ратеев М.А., Хеиров М.Б. Глинистые минералы во взвесах прибрежной зоны Белого моря // Изв. вузов. Геология и разведка. 1974. № 3. С. 52–60.
13. Лаврова М.А. Четвертичная геология Кольского полуострова. М.-Л.: Изд.-во АН СССР, 1960. 233 с.
14. Лазарева Е.В., Романкевич Е.А. Транспорт органического вещества и глинистых минералов в эстуариях арктических морей (эксперимент и натурные наблюдения) // Океанология. 2009. Т. 49. № 1. С. 53–60.
15. Левитан М.А., Васнер М., Нюрнберг Д., Шелехова Е.С. Средний состав ассоциаций глинистых минералов в поверхностном слое донных осадков Северного Ледовитого океана // Докл. РАН. 1995. Т. 344. № 3. С. 364–366.
16. Лисицын А.П. Методы сбора и исследования водной взвеси для геологических целей // Тр. Ин.-та океанологии АН СССР. 1956. Т. XIX. С. 204–230.
17. Лисицын А.П. Новые данные о составе и распределении взвешенных веществ в морях и океанах в связи с вопросами геологии // Докл. АН СССР. 1956. Т. 126. № 4. С. 863–867.

18. Лисицын А.П. Осадкообразование в океанах. М.: Наука, 1974. 438 с.
19. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
20. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И. и др. Взвесь и гидрооптика Белого моря – новые закономерности количественного распределения и гранулометрии // Актуальные проблемы океанологии / Под ред. Лаврова Н.П. М.: Наука, 2003. С. 556–607.
21. Лисицын А.П. Процессы в водосборе Белого моря: подготовка, транспортировка и отложение осадочного материала, потоки вещества, концепция “живого водосбора” // Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря. М.: Научный мир, 2010. С. 353–445.
22. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Немировская И.А. и др. Развитие четырехмерной океанологии и создание фундаментальных основ комплексного мониторинга морских экосистем (на примере Белого моря) // Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей / Отв. ред. Шаповалов С.М. М.: Научный мир, 2010. С. 559–597.
23. Мурдмаа И.О., Богданова О.Ю., Горшкова А.И. и др. Минералы железа и марганца во взвеси Баренцева моря // Литология и полезные ископаемые. 2000. № 6. С. 665–669.
24. Невесский Е.Н., Медведев В.С., Калинин В.В. Белое море: седиментогенез и история развития в голоцене. М.: Наука, 1977. 236 с.
25. Павлидис Ю.А., Щербаков Ф.А., Шевченко А.Я. Глинистые минералы донных осадков шельфа Кубы и Белого моря: геология и климат – сопоставления // Океанология. 1995. Т. 35. № 1. С. 121–127.
26. Политова Н.В. Особенности распределения и состава взвеси и потоков осадочного вещества в Баренцевом и Печорском морях. Дис. на соиск. уч. степени к.г.-м.н. 2007. 251 с.
27. Ратеев М.А., Рассказов А.А., Шаброва В.П. Глобальные закономерности распределения и формирования глинистых минералов в современных и древних морях, Мировом океане и геологические факторы. М.: ОИФЗ РАН, 2001. 200 с.
28. Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Под ред. Брауна Г. М.: Мир, 1965. 599 с.
29. Русаков В.Ю., Лисицын А.П., Изотова С.С. и др. Распределение и состав минеральной взвеси в желобе Франц-Виктория (северная часть Баренцева моря) // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 267–277.
30. Серова В.В., Горбунова З.Н. Минеральный состав почв, аэрозолей, взвешенного вещества и донных осадков устьевой части реки Лены и моря Лаптевых // Океанология. 1997. Т. 37. № 1. С. 131–135.
31. Система Белого моря. Т. I. Природная среда водосбора Белого моря / Отв. ред. Лисицын А.П. М.: Научный мир, 2010. 480 с.
32. Сорокин В.М. Четвертичное осадконакопление во внутриконтинентальных морях // Вестник МГУ. 2004. Сер. 4. Геология. № 2. С. 50–64.
33. Спиридонов М.А., Девдариани Н.А., Калинин А.В. и др. Геология Белого моря // Советская геология. 1980. № 4. С. 45–55.
34. Шевченко В.П., Покровский О.С., Филиппов А.С. и др. Об элементном составе взвеси реки Северная Двина (бассейн Белого моря) // Докл. РАН. 2010. Т. 430. № 5. С. 686–692.
35. Шелехова Е.С., Нюрнберг Д., Васнер М. и др. Распределение глинистых минералов в поверхностном слое осадков юго-западной части Карского моря // Океанология. 1995. Т. 35. № 3. 435–439.
36. Biscaye P.E. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans // Geological Society of America Bulletin. 1965. V. 76. P. 803–832.
37. Lukashin V.N., Ljutsarev S.V., Krasnyuk A.D. et al. Suspended particulate matter in the Ob and Yenisei estuaries // Ber. Polarforsch. 1999. V. 300. P. 155–178.
38. Müller C., Stein R. Grain-size distribution and clay-mineral composition in surface sediments and suspended matter of the Ob and Yenisei rivers // Ber. Polarforsch. 1999. V. 300. P. 179–187.
39. Saukel C. Tonmineral- und Korngrößenverteilung in oberflächennahen Sedimenten aus dem Weißen Meer als Indikatoren für rezente Transportprozesse und Quellen der terrigenen Fraktion // Diplomarbeit im Fachgebiet Geographie, Universität Osnabrück. Osnabrück/Bremerhaven, 2006. 98 p.
40. Saukel C., Stein R., Vogt Ch., Shevchenko V.P. Clay-mineral and grain-size distributions in surface sediments of the White Sea (Arctic Ocean): indicators of sediment sources and transport processes // Geo-Mar Lett. 2010. № 30. P. 605–616.
41. Stein R., Dittmers K., Fahl K. et al. Arctic (paleo) river discharge and environmental change: evidence from the Holocene Kara Sea sedimentary record // Quaternary Science Reviews. 2004. V. 23. № 11–13. P. 1487–1511.

Mineral Composition of Suspended Particulate Matter in the White Sea

M. D. Kravchishina, O. M. Dara

The study of SPM mineral composition in the White Sea water column was carried out. The comparison with the mineral composition of river SPM of the sea catchment basin, including one of the major sources of terrigenous suspended matter – the Northern Dvina River, was done. These researches involve a number of technical difficulties, which slows down the development of these studies. The literature data on the mineral composition of SPM is extremely limited. Using the method of X-ray powder diffraction we were able to examine the total mineral composition of SPM and the composition of its clay fraction.