

УДК 551.465

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО И МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ВЗВЕСИ В МАРГИНАЛЬНОМ ФИЛЬТРЕ СЕВЕРНОЙ ДВИНЫ (БЕЛОЕ МОРЕ)

© 2020 г. В. В. Гордеев<sup>1</sup> \*, О. М. Дара<sup>1</sup>, Т. Н. Алексеева<sup>1</sup>, А. И. Коченкова<sup>1</sup>,  
А. Г. Боев<sup>1</sup>, А. С. Лохов<sup>1</sup>, С. К. Белоруков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

\*e-mail: gordeev@ocean.ru

Поступила в редакцию 30.10.2019 г.

После доработки 30.10.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Представлены первые результаты изучения сезонных вариаций гранулометрического и минерального составов взвеси реки Северной Двины. Пробы взвеси отбирались ежемесячно в 2016–2017 гг. на выходе из протоки Кузнечиха в протоку Маймакса, впадающую в Двинский залив. Гранулометрические фракции выделялись методом водно-механического анализа по Петелину с сохранением фракций для последующих исследований с помощью электронного микроскопа, энерго-дисперсионного рентгеновского микроанализатора и рентгенографического дифрактометра. Результаты показали, что в гранулометрическом спектре взвеси Северной Двины преобладают пелитовая фракция и самая тонкая ее часть – субколлоидная фракция при подчиненной роли более крупных фракций. Сезонные изменения концентрации взвеси, содержания суммы обломочных и суммы глинистых минералов находятся под влиянием водного стока реки и достигают максимума в периоды высокой воды (на пике весеннего половодья и отчасти в конце лета и осенью в сезон дождей). В распределении тонких фракций выделяется субколлоидная фракция мартовской пробы. Вклад этой фракции в валовую пробу (60%) оказался наибольшим по сравнению с вкладом субколлоидных фракций во все остальные пробы года. Удалось установить, что это связано, по-видимому, с наибольшим содержанием в этой фракции тонкодисперсных обломочных минералов. Вопрос о том, почему это произошло в марте, остается открытым.

**Ключевые слова:** Северная Двина, маргинальный фильтр, речная взвесь, гранулометрический состав, минералогия взвеси, сезонные вариации

DOI: 10.31857/S0030157420030016

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в Институте океанологии РАН особое внимание уделяется исследованию рассеянных в средах (в речной и морской воде, атмосфере, льдах) микро- и наночастиц, которые при осаждении дают начало связанным формам вещества – донным осадкам [12–14, 16]. Значительное место в этих исследованиях занимают работы по изучению седиментологических и геохимических процессов в речных водах и зонах смешения река–море, как важнейших барьеров на пути осадочного материала с континента в океан [1, 2, 11]. Принципиальным моментом в этих работах является включение в систему исследований морей и океанов дополнительно к трем координатам пространства четвертой координаты – времени [15]. При изучении речного стока это в определенной мере достигается созданием постоянно действующих обсерваторий. Примером

может служить “Обсерватория Маргинальный фильтр реки Северной Двины”, созданная весной 2015 г. на базе Северо-Западного отделения ИО РАН в Архангельске [3, 8, 9].

Гранулометрический состав представляет собой важную характеристику взвесей и донных осадков, которая во многом определяет их химический состав. Гранулометрия – это разделение образца на фракции по крупности частиц. Этот метод исследований применяется уже много лет. В СССР систематические наблюдения за гранулометрическим составом речных наносов проводились с 30-х годов прошлого столетия. Обобщения, касающиеся распределения гранулометрического состава речных наносов, производились только в нашей стране [17, 18, 22]. Однако с точки зрения геохимии данные гранулометрического анализа стали использовать позже. Одной из первых была статья [19]. В ней результаты анализа

гранулометрического состава взвесей рек Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби были представлены наряду с данными по гранулометрическому и химическому составам донных осадков устьевых участков тех же рек. Работы по отбору проб проводились последовательно с начала июня на Северной Двине до середины июля 1969 г. в устье Оби.

Гранулометрия взвеси в зонах смешения рек бассейнов Белого, Азовского и Каспийского морей изучалась в работе [5]. Довольно детально анализ гранулометрического, рентгенографического и химического составов взвеси Северной Двины был выполнен в работе [10]. Пробы взвеси отбирались ежедневно с середины по конец мая 2004 г. Использовали два метода анализа — гидравлический (водно-механический) и лазерный. Исследования показали, что в период весеннего половодья транспортируемая речными потоками взвесь состоит преимущественно из минеральных агрегатов размером 0.015–0.040 мм. Скопления этих частиц в виде глобул состоят из глинистых минералов (иллита, хлорита, каолинита и смектита). Авторы выделяют два основных фактора образования взвеси: 1) влияние состава пород водосборного бассейна реки; 2) смена основных гидрологических процессов (приливных течений, флуктуаций стока реки, абразии берегов и дна и др.), которые определяют механическое фракционирование взвеси по размерам частиц и их вещественному составу.

Большое внимание изучению гранулометрического состава речных взвесей уделяется и специалистами западных стран. На наш взгляд, наиболее значительный вклад в этом отношении внесли многочисленные работы специалистов разных стран, работавших в рамках международного проекта “Транспорт углерода и минералов крупнейшими реками Мира”, руководителем которого был крупный немецкий ученый Дегенс [23, 26]. Существенный вклад в понимание процессов переноса и трансформации взвешенных веществ в водах рек, озер, эстуариев и океана внесла монография голландского ученого Эйсмы [24].

Минеральный состав речных взвесей тесно связан с их гранулометрическим составом. В работе [27] показана четкая взаимосвязь в распределении минералов взвеси р. Амазонки в зависимости от размеров частиц. Иванова и Коновалов [6] опубликовали результаты минералогического анализа взвесей 14-ти рек СССР. Авторы работы [21], изучая факторы формирования глинистого материала взвеси рек и оросительных систем Средней Азии, установили, что на состав глинистых минералов решающее влияние оказывают два фактора: характер пород водосбора (определяет набор глинистых минералов) и рельеф водосбора (приводит к дифференциации состава тонких взвесей).

Анализ распространенности глинистых минералов, основанный на данных по 81 реке из разных климатических зон, показал зависимость размещения глинистых минералов от климатической зональности [4] — это третий фактор, определяющий состав глинистого вещества речных взвесей.

Минеральный состав речных взвесей, наряду с их гранулометрическим и химическим составами, изучался специалистами из разных стран в рамках уже упоминавшегося проекта “Транспорт углерода и минералов крупнейшими реками Мира”. В 7-ми томах, опубликованных по результатам этого проекта, представлена серия статей с результатами исследований минерального состава взвесей многих рек Мира (упомянем лишь некоторые [25, 26, 28, 29]).

Представленный выше далеко не полный обзор исследований гранулометрического и минерального составов речных взвесей не дает, однако, практически никакой информации о их вариациях как в разные сезоны года, так и тем более об изменениях между годами.

Цель данной работы состоит в представлении первых результатов изучения сезонных вариаций гранулометрического и минерального составов взвеси Северной Двины в 2016–2017 гг.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор проб воды проводился ежемесячно в 2016 и 2017 гг. с поверхности пластиковым ведром в двух точках (рис. 1) — причалов в черте города Архангельска (Яхт-клуб) и в полукилометре выше по течению от порта Экономия в протоке Кузнециха вблизи входа в протоку Маймакса, впадающую в Двинский залив [7] (рис. 2). В настоящей работе использованы пробы взвеси, полученные во второй точке. Следует подчеркнуть, что эта точка представляет собой, по сути, начальную точку зоны смешения река—море, т.е. маргинального фильтра реки Северной Двины, где протекающие седиментологические и биогеохимические процессы, сильно влияющие на объемы выносимого в море осадочного материала, во многом зависят от гранулометрического, минерального и химического состава изучаемой нами взвеси. Пробы объемом от 200 до 800 л (в периоды минимальной концентрации взвеси) переливались в полиэтиленовые канистры объемом 50 л. После 3–4 сут отстаивания основная масса воды декантировалась. Остатки сливались в 5 л полиэтиленовые бутылки, из которых после суточного отстаивания излишки воды удалялись. Взвесь с остатками воды (около 30 мл) высушивалась в сушильном шкафу при +47°C.

Отдельная 5 л канистра наполнялась пробой при завершении пробоотбора. Эта вода фильтро-

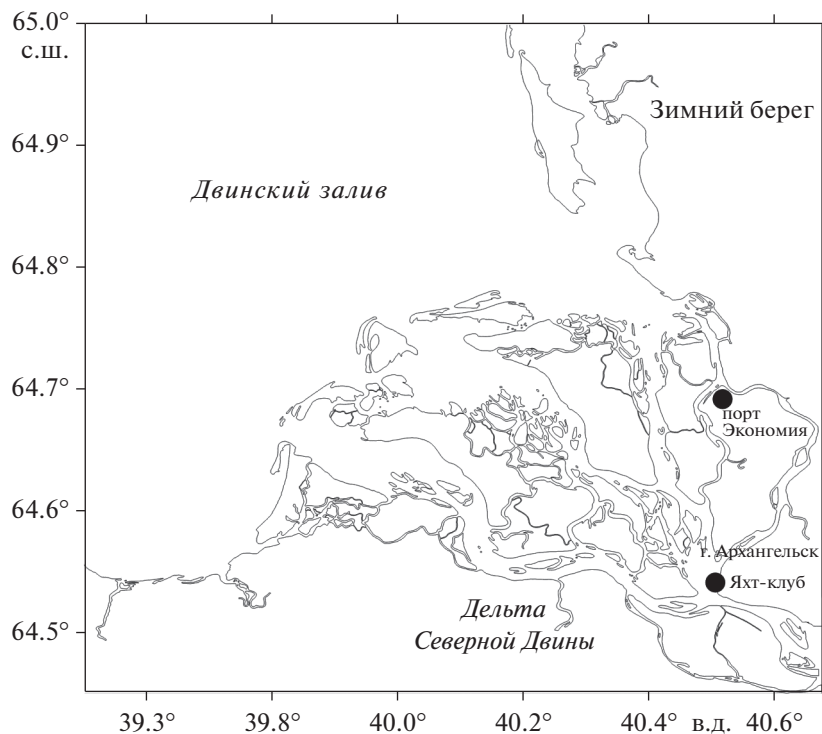


Рис. 1. Карта станций.

валась через мембранные ядерные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0.4 мкм производства ОИЯИ, г. Дубна с целью определения концентрации взвеси в пробе.

Разделение валовых проб взвеси на фракции с их сохранением для последующего исследования выполнялось гидравлическим (водно-механическим) методом по Петелину [20].

Электронно-микроскопические исследования выполнялись с помощью электронного микроскопа TESCAN Vega. Полуколичественный химический состав частиц определялся на энерго-

дисперсионном рентгеновском микроанализаторе EDX X-Max.

Минеральный состав образцов водной взвеси реки изучался с применением рентгенографического фазового анализа на дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXS). Для первичной обработки, расшифровки спектров и расчета использовалась программа PDF-2ICDD (International Centre for Diffraction Data).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Режим водного стока Северной Двины в 2016–2017 гг. показан на рис. 2.

Резко выделяется весенний период, примерно со второй половины апреля до начала июля. Весенний пик 2016 г. более выражен по сравнению с пиком 2017 г. Интенсивность последнего пика заметно ниже, он растянут по времени. Выделяется осенний пик, связанный, по-видимому, с сильными дождями.

Концентрация взвеси (рис. 3) четко следует за водным стоком — максимумы наблюдались в мае 2016 г. (до 20–30 мг/л) и в 2017 г. также в мае (17–34 мг/л), при фоновом уровне зимой (2–5 мг/л). В летне-осенний период колебания более значительны (до 9–12 мг/л в период интенсивных дождей при фоновом уровне 5–7 мг/л). Концентрация взвеси в речных водах на двух станциях не всегда совпадала. Очень близкие концентрации

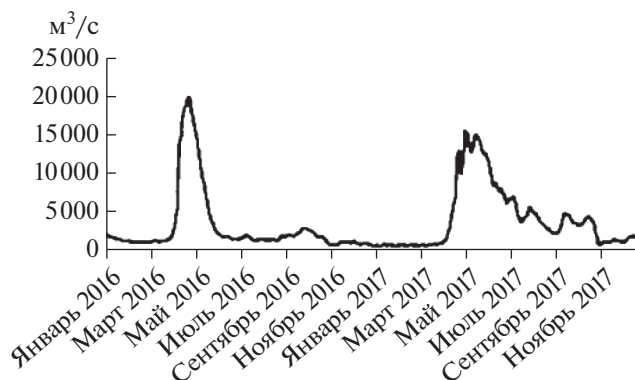


Рис. 2. Сезонные изменения водного стока Северной Двины в 2016–2017 гг.

взвеси отмечались в работе [10]. Авторы этой работы подчеркивали, что концентрация взвеси существенно зависит от фазы прилива, особенно в придонном слое (во время отлива мутность может увеличиваться в 2–2.5 раза). Пробы на причале Яхт-клуба и в порту Экономия обычно отбирались в один и тот же день, но в разное время, реже в – разные дни. Именно этим можно объяснить разницу в концентрации взвеси в двух точках отбора (рис. 3).

В течение года во взвеси Северной Двины не было обнаружено песчаной фракции (1.0–0.1 мм) (табл. 1).

Весной 2004 г. в 12-ти полученных отстаиванием пробах взвеси фракция 0.25–0.10 мм была обнаружена тем же методом водно-механического анализа во всех пробах в количестве от 0.24 до 12.53%. Пробы из устьевой области реки содержали следы этой фракции (0.24–0.68%, в одной пробе из верховьев протоки Маймаксы было определено 3.2%) [10]. Также в одной пробе взвеси, полученной 2 июня 1969 г. в 12 км выше Архангельска [19], были обнаружены не только 1.39% этой фракции, но даже еще 2.9% фракции 0.5–0.25 мм, т.е. проба содержала вполне осязаемое количество мелкого песка.

Фракция грубых алевритов (0.1–0.05 мм) варьирует, по нашим данным, в пределах 1.10–5.41%, в среднем 2.61%. В пробах устьевой области Северной Двины в 2004 г. содержание этой фракции составляло 0.78–6.8%, в среднем 2.97%, а в пробе 1969 г. – 9.16%. На долю тонких алеври-

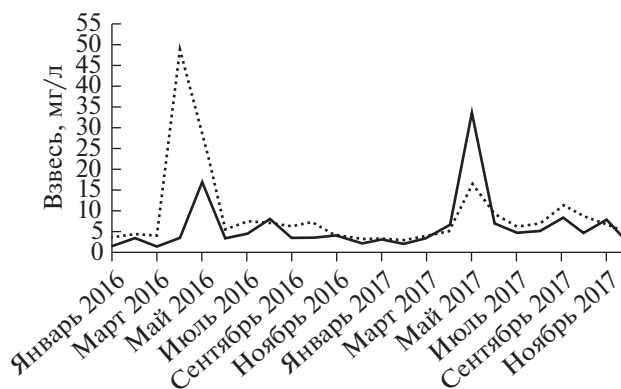


Рис. 3. Сезонные изменения концентрации взвеси в нижнем течении Северной Двины в 2016–2017 гг. Сплошная линия – причал Яхт-клуб в г. Архангельск. Штриховая линия – порт Экономия.

тов (0.05–0.01 мм) приходилось, по нашим данным, 0.86–4.2%, в среднем 1.65%, тогда как весной 2004 г. 1.88–9.25%, в среднем 5.15%, а весной 1969 г. – 16.94%.

Заметна разница между нашими результатами и данными двух предыдущих работ – в наших пробах наиболее крупные из измеренных фракций содержались в меньших количествах по сравнению с весной 2004 и 1969 гг. В основном это связано с тем, что ранее исследовались только образцы взвеси периода высокой воды. Наши данные для весны 2016–2017 гг. – фракции 0.25–0.1, 0.1–0.05 и 0.05–0.01 мм соответственно 0, 1.72–

Таблица 1. Гранулометрический состав взвеси Северной Двины (в весовых % от вала). Пробы взвеси за февраль и декабрь 2017 г. заменены пробами 2016 г. Апрель представлен пробами 2016–2017 гг., которые показали незначительные различия между собой

Проба	Фракция, мм				
	0.1–0.05	0.05–0.01	0.01–0.005	0.005–0.001	<0.001
Февраль 2016	2.11	0.95	32.63	28.42	35.89
Апрель 2016	5.41	4.37	43.54	21.67	25
Декабрь 2016	5.40	2.7	32.43	24.32	35.14
Январь 2017	2.63	2.37	28.95	26.32	39.74
Март 2017	2.35	1.17	21.17	15.29	60
Апрель 2017	5.34	3.05	41.91	21.3	28.4
Май 2017	1.72	0.86	40.52	25	31.89
Июнь 2017	1.03	0.93	30.93	34.02	33.09
Июль 2017	1.1	1.3	22.5	35.1	40
Август 2017	1.25	1.13	37.5	27.5	32.62
Сентябрь 2017	2.2	1.1	38.46	29.67	28.57
Октябрь 2017	2.97	1.98	44.55	22.77	27.72
Ноябрь 2017	2.67	1.33	33.2	28	34.8

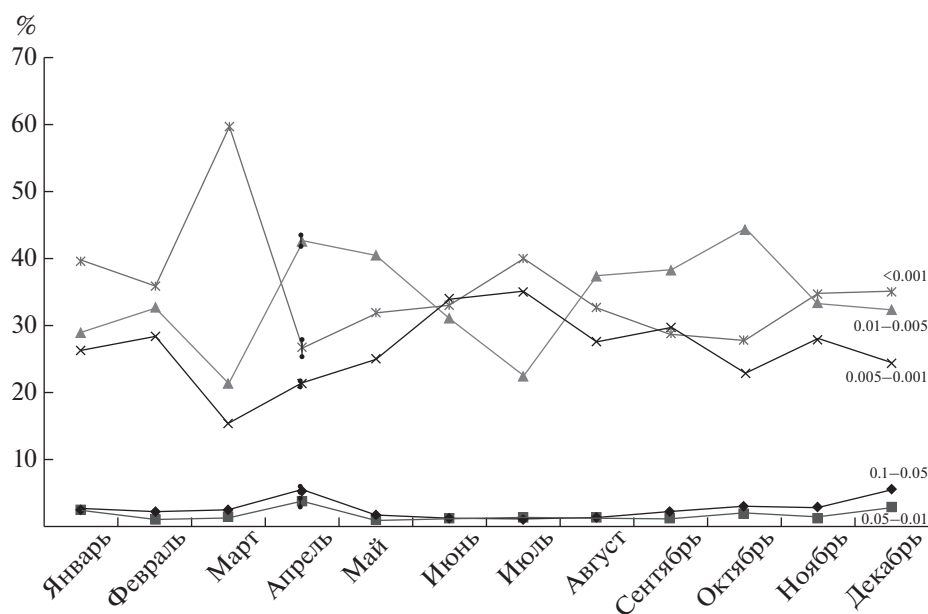


Рис. 4. Сезонные изменения гранулометрического состава взвеси реки Северной Двины в 2017 г.

5.38 и 0.86–4.2%. Это немного ближе к данным предыдущих работ, но все равно ниже их. Учитывая, что методы отбора и анализа проб во всех трех работах были одни и те же, различия между пробами, по-видимому, реально существовали.

На долю фракций 0.01–0.005 и 0.005–0.001 мм приходится, по нашим данным, соответственно 22.50–44.75%, ср. 33.80%, и 15.29–35.10%, в среднем 29.1%, тогда как в предыдущих работах эти фракции составляли 10.78–12.57, ср. 11.66% (2004 г.), и 7.11 и 20.4% (1969 г.). Последние значения заметно ниже, чем наши. Весенние пробы 2017 г. содержали 21.18–42.70 и 15.3–21.5% этих фракций, что также превышает результаты предыдущих работ. Субколлоидная фракция (<0.001 мм) составляла, по нашим данным, 26.7–60.0%, ср. 39.74%, против более ранних определений – 53.12–60.78, ср. 57.2% (2004 г.) и 42.1% (1969 г.).

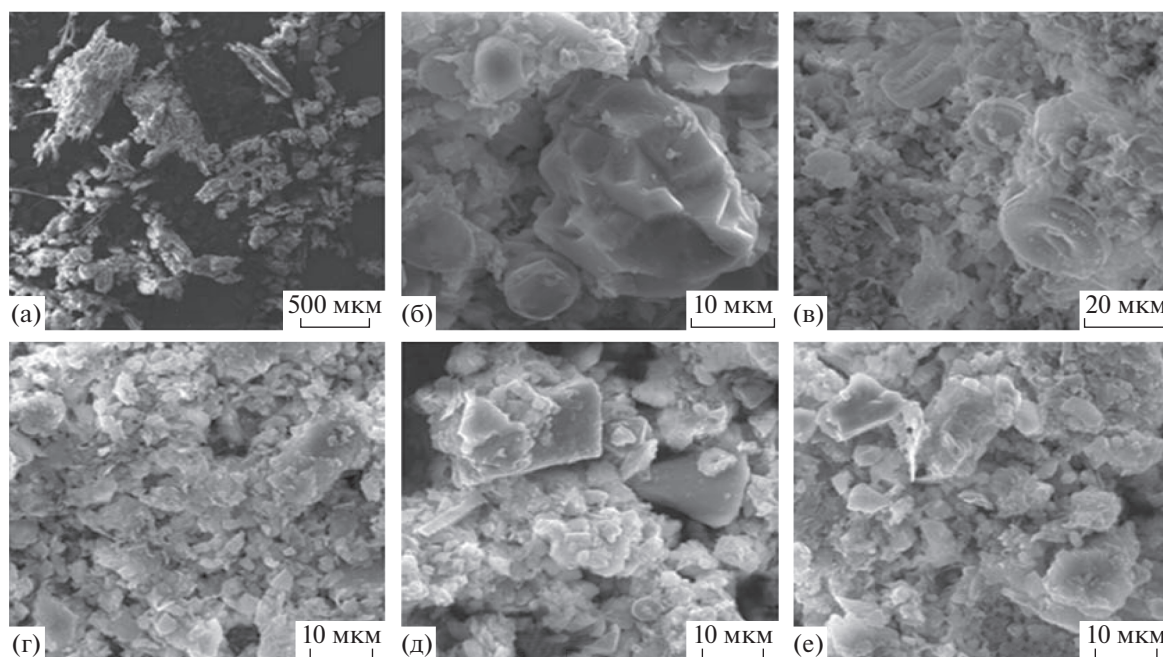
Сумма фракций, составляющих пелитовую (<0.01 мм), и сумма алевритовых и песчаных фракций (>0.01 мм) в 2016–17, 2004 и 1969 гг. составляли в среднем 94.5% (90.2% весной), 86.7%, 69.6% и 5.4% (9.8% весной), 13.3%, 30.4%. Очевидно, что взвесь Северной Двины в 2016–2017 гг. была заметно более тонкой, чем весной 2004 г. и, особенно, весной 1969 г. При этом вклад субколлоидной фракции, по нашим данным, в среднем 40% (29.3% весной) существенно ниже, чем по данным предыдущих работ. В то же время, доля крупных пелитов (0.01–0.005 и 0.005–0.001 мм) в наших пробах выше, чем ранее.

Таким образом, в гранулометрическом спектре взвесей Северной Двины резко преобладают пелитовая и составляющая ее самая тонкая субколлоид-

ная фракции при подчиненной роли алевритовой и ничтожной доле (или их полном отсутствии) более крупных фракций (>0.1 мм).

Сезонный ход фракций показан на рис. 4. Подчеркнем, что для апрельской пробы приводится два значения каждой фракции – это пробы апреля 2016 и 2017 гг. (табл. 1). Как видно, различия между двумя пробами минимальные. Это не означает, что подобные различия будут иметь место и для других месяцев, но позволяет в определенной мере считать замену февральской и декабрьской проб 2017 г. пробами тех же месяцев предыдущего года вполне допустимой. Как уже отмечалось, хорошо видно, что более крупные частицы алевритовой размерности (0.1–0.05 и 0.05–0.01 мм) играют в течение всего года подчиненное значение, не выходя в сумме за 10% от вала. Однако некоторые изменения этих фракций по сезонам имеют место. Выделяются апрельские пробы каждой из фракций (5.4 и 3.7–4.2%) по сравнению с 1.1–3.0 и 0.9–2.4% в другие сезоны года. Повышенный вклад более грубых фракций в период весеннего половодья вполне ожидаем. Мощное течение реки в это время, достигающее 3–4 м/с, способно транспортировать более крупные, чем в другие сезоны, частицы. Однако неожиданно высоким оказался вклад фракции 0.1–0.05 мм в декабре 2016 г. (5.4%). Низкий сток воды подо льдом (рис. 2) свидетельствует о заметном более низких скоростях течения. Гораздо в большем диапазоне колеблются доли тонких фракций – 0.01–0.005, 0.005–0.001 и <0.001 мм в течение года. Выделяется пик субколлоидной фракции в марте (60% против 25–49% в другие месяцы).





**Рис. 5.** Характерные частицы взвеси р. Северной Двины в 2016–2017 гг. (а) – растительные остатки; (б, д) – обломочные частицы полевого шпата и глинистые частицы; (в) – диатомовые водоросли на глинистых частицах; (г, е) – глинистые частицы.

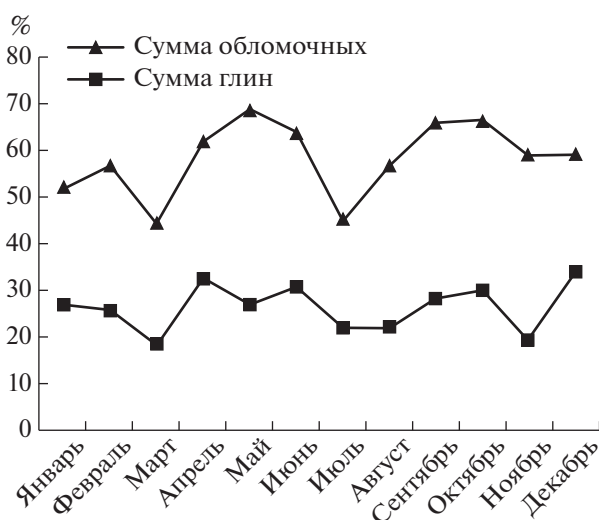
Чтобы найти ответ на вопрос, каковы причины этих фактов, обратимся к электронно-микроскопическим и минералогическим данным.

Полуколичественные определения основных элементов химического состава образцов по площади сканирования электронным пучком от 300 до 500 мкм<sup>2</sup> (содержание, по оценкам, порядка 10 тыс. частиц) показали близкий химический состав всех фракций.

По характерной чешуйчато-листовой форме частиц (рис. 5) и данным анализа видно, что в пробах преобладают глинистые частицы. Для отдельных частиц неправильной угловатой формы были сделаны локальные химические анализы в точке. Эти данные показали, что кроме преобладающих глинистых частиц в каждой фракции присутствуют единичные частицы минералов, типичных для магматических и метаморфических горных пород водосбора. К частицам неглинистого состава относятся частицы плагиоклаза, калиевых полевых шпатов, кварца, амфибола, рутила, титаномагнетита. Среди биогенных частиц обнаружены диатомовые водоросли (отдельные створки и обломки) (рис. 5в). В мартовской пробе во всех фракциях наблюдается большее количество фрагментов диатомовых. А в субколлоидной фракции их больше, чем во фракции <0.001 мм апрельской и октябрьской проб. Во фракции 0.1–0.05 мм мартовской пробы отмечено много не отсортированных растительных остатков. Иногда встречаются единичные частицы антропогенного

происхождения (сферы сгорания, металлические частицы).

Исследование сезонных вариаций минерального состава валовых (без разделения на фракции) проб (табл. 2, рис. 6) показало, что группа обломочных минералов представлена кварцем (15–34%), альбитом (8–21%), калиевыми полевыми шпатами (8–16%), минералами группы амфибола (роговая обманка 3–8%), минералами



**Рис. 6.** Сезонные изменения суммы обломочных и суммы глинистых минералов во взвеси Северной Двины в 2016–2017 гг.

**Таблица 2.** Минеральный состав образцов отстоя водной взвеси устья реки Северная Двина (май 2016—апрель 2017 гг.)

Мас. %	Янв. 17	Февр. 17	Март 17	Апр. 17	Май 16	Июнь 16	Июль 16	Авг. 16	Сент. 16	Окт. 16	Нояб. 16	Дек. 16
Кварц	23	30	19	19	34	32	15	22	31	34	27	18
Альбит	11	13	8	21	16	18	9	13	14	16	11	9
Кпш	9	9	9	13	16	10	8	9	8	9	8	8
Амфибол	5	4	4	5	3	4	4	4	4	4	3	8
Пироксен	4	1		4			3	3	4	3	4	6
Эпидот			4				6	6	5		5	10
Анатаз										1	1	
Сумма обломочных	52	57	44	62	69	64	45	57	66	67	59	59
Q/Fsp	1.2	1.4	1.1	0.6	1.1	1.1	0.9	1	1.4	1.4	1.4	1
Смектит-Mg, Ca					8	9			8	9		
Смектит-Na, K	5	5		8			4	4			5	7
Иллит	11	11	8	14	9	10	9	9	10	10	9	12
Каолинит	5	5	4	5	4	5	3	4	4	4	?	8
Хлорит	6	5	6	6	6	7	6	5	6	7	5	7
Ссо	Следы		Следы	Следы			Следы					Следы
Сумма глин	27	26	18	33	27	31	22	22	28	30	19	34
Σоблом/Σглин	1.93	2.19	2.44	1.88	2.6	2.06	2.04	2.59	2.34	2.23	3.1	1.73
Кальцит	1	2	2	1					1			2
Доломит	2	3	2	4	3	5	2	2	2	3	2	4
Арагонит									1			
Пирит		1							1			
Гипс	2	2					3	2			2	
Галит	15	9	33				28	17			18	

группы пироксена (диопсид, авгит 1–6%), эпидотом (5–10%) и анатазом (1%). Суммарное содержание минералов этой группы варьирует в пределах 44–69% (в среднем 58.4%). Максимальные содержания характерны для апреля–июня и сентября–октября. Именно в эти месяцы отмечаются наиболее высокие месячные стоки воды (рис. 2). Наименьшие содержания встречены в зимние месяцы (минимум в марте – 44% и в июле – 45%).

Группа глинистых минералов представлена иллитом, магнезиально-железистым хлоритом, каолинитом. Диагностирован диоктаэдрический смектит с переменным значением межплоскостного базального рефлекса  $d_{001}$  (от 12.3 до 14.5 Å), что отражает колебания в составе межслоевых катионов ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{1+}$ ,  $\text{Na}^{1+}$ ). Отметим, что появление в пробах щелочного 12-ангстремового смектита (межслоевые катионы  $\text{K}^{1+}$ ,  $\text{Na}^{1+}$ ) сопро-

вождается увеличением солёности вод, что подтверждается наличием галита ( $\text{NaCl}$ ). При отсутствии галита образцы содержат щелочно-земельный 14-ангстремовый смектит (межслоевые катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ).

Общее количество глинистых минералов колеблется в течение года в пределах 18–34%, ср. 24.7%. Минимальные количества встречены в марте (18%) и ноябре (19%), максимальные в апреле–июне, сентябре–октябре и декабре (рис. 6). Эти колебания зависят, главным образом, от содержания во взвеси монтмориллонита (смектита), содержание которого возрастает с увеличением объема речного стока (декабрь выпадает из этого правила). Из минералов группы карбонатов отмечены доломит (2–5%), кальцит (с декабря по апрель 1–2%) и арагонит (1% в сентябре). В нескольких пробах диагностированы пирит и гипс.

Анализ разных фракций проб взвеси, отобранных в декабре, феврале, марте, апреле, августе и октябре, показал, что группа глинистых минералов (каолинит, хлорит, иллит и смектит) присутствует во всех фракциях с общим содержанием от 5% (фракция 0.05–0.01 мм, апрель 2017 г.) до 55% (<0.001 мм, апрель 2017 г.). Содержание глин возрастает к тонким фракциям за счет увеличения количества всех минералов, но особенно – смектита. Из минералов группы карбонатов отмечены кальцит (1–2%), арагонит (1%), доломит (2–5%). Содержание обломочных минералов во фракциях 0.1–0.05 и 0.05–0.01 мм достигает 93%. Наибольший разброс характерен для кварца – от 23% в тонких фракциях до 72% в крупных.

Мартовская проба демонстрирует наименьшие колебания между всеми фракциями. Так, содержание кварца во фракции 0.1–0.05 мм не превышает 30%, что является наименьшим значением для этой фракции. В остальных фракциях оно колеблется в пределах 31–42%, при этом в субколлоидной фракции содержание кварца достигает 38%. В другие месяцы алевритовые фракции содержат порядка 50–72% при практически тех же содержаниях этого минерала (20–35%), что и мартовские фракции.

Похожая ситуация наблюдается для сумм обломочных и глинистых минералов. Так, сумма обломочных минералов мало меняется между фракциями – от 62–73% в алевритовых фракциях до 60–63% в самых тонких фракциях. При этом значения этой суммы для других месяцев снижаются с 80–90% до даже более низких величин относительно марта (до 45–58%). Здесь выделяется субколлоидная фракция мартовской пробы, она составляет 61%, что является наибольшим значением в этой фракции остальных месяцев.

Сумма глинистых минералов варьирует в марте от 20–28% в алевритах до 35–40% в тонких пелитах, тогда как в другие месяцы происходит рост от 15–20 до 42–55%. При этом в субколлоидной фракции мартовской пробы сумма глинистых минералов минимальна (35% против 42–55% в другие месяцы). Эти данные свидетельствуют о том, что именно за счет тонкодисперсных обломочных минералов эта фракция в мартовской пробе выделяется на фоне той же фракции в другие месяцы года.

Декабрьская проба отличается наличием во фракции 0.1–0.05 мм большого содержания монтмориллонита (смектита) (21%), что обычно более характерно для наиболее тонких фракций.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ежемесячный отбор проб взвеси из больших объемов воды нижнего течения реки Северной Двины в 2016–2017 гг. позволил впервые полу-

чить данные о сезонных вариациях гранулометрического и минерального составов взвешенного материала со столь высокой дискретностью. Гранулометрические фракции были выделены методом водно-механического анализа по Петелину с сохранением самих фракций для последующих анализов разного типа. Концентрация взвеси в течение года хорошо коррелирует с водным стоком, достигая максимума в период весеннего половодья (апрель–июнь) и повышаясь в период летне-осеннего периода интенсивных дождей (август–сентябрь).

Результаты показали, что в гранулометрическом спектре взвеси Северной Двины преобладают пелитовая фракция, включая субколлоидную, при подчиненной роли алевритовой и более крупных фракций (на долю суммы фракций 0.1–0.05 и 0.05–0.01 мм приходится не более 10%). На пике весеннего паводка сумма этих фракций достигает годового максимума, что вполне объясняется способностью мощных потоков талых вод переносить частицы достаточно крупного размера. В то же время, почти такое же содержание крупных фракций отмечено в декабре, когда скорость подледного течения заметно ниже.

Среди тонких фракций выделяется субколлоидная фракция (<0.001 мм) мартовской пробы, что довольно неожиданно и требует специального рассмотрения и объяснения.

Просмотр разных фракций под электронным микроскопом и данные полуколичественного химического анализа свидетельствуют о преобладании во всех фракциях глинистых частиц и присутствии отдельных частиц обломочных минералов. В мартовской пробе во всех фракциях наблюдается большое количество фрагментов створок диатомовых и растительных остатков (последних особенно много во фракции 0.1–0.05 мм).

Исследования сезонных вариаций минерального состава валовых (без разделения на фракции) проб показало, что суммарное содержание группы обломочных минералов меняется в течение года в пределах 44–69%. Как и ожидалось, наибольшие содержания характерны для периодов высокой воды (весна и лето–осень). Наименьшие содержания встречены в зимние месяцы (минимум в марте) и в июле при установившемся речном стоке. Сумма глинистых минералов в значительной мере меняется по сезонам в сходной манере, т.е. повышенные содержания характерны для периодов высокой воды (сюда же примыкает декабрьская проба, когда водный сток низкий). Важно подчеркнуть, что минимальные содержания суммы глинистых минералов отмечены в марте (18%) и ноябре (19%). Данные минералогического анализа свидетельствуют о том, что наибольшее влияние на величину суммы оказывает смектит.



Мартовская проба выделяется среди других месяцев наименьшими колебаниями как обломочных, так и глинистых минералов между разными фракциями. Например, кварца, основного обломочного минерала, во фракции 0.1–0.05 мм содержится только 30%, в субколлоидной — 38%, что больше, чем в этой фракции в другие месяцы. Сумма обломочных минералов в этой фракции мартовской пробы также самая высокая — 61% против 45–58%. Сумма глинистых минералов в этой фракции, напротив, минимальна — 35% против 42–55%. Таким образом, из этих данных следует, что пиковое содержание субколлоидной фракции в марте (60%) связано, в первую очередь, с вкладом тонкодисперсных обломочных минералов. Но почему это происходит в марте пока не ясно.

И, наконец, объяснить высокое содержание фракции 0.1–0.05 мм в декабре пока не удается, поскольку она мало отличается от этой фракции в другие месяцы, за исключением необычно высокого содержания в ней монтмориллонита (сметита).

Работы по данной тематике планируется продолжить и углубить.

**Благодарности.** Авторы признательны академику А.П. Лисицыну за внимание к работе.

**Источник финансирования.** Получение материала выполнено в рамках Государственного задания ИО РАН по теме № 0128-2019-0011. Обработка материала и интерпретация выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-17-00234.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев В.В. Геохимия системы река-море. М.: Матушкина И.И., 2012. 452 с.
2. Гордеев В.В., Лисицын А.П. Геохимическое взаимодействие пресноводной (речной) и морской геосфер // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 721–744.
3. Гордеев В.В., Чульцова А.Л., Коченкова А.И. и др. Сезонные вариации концентраций растворенных неорганических форм биогенных элементов в нижнем течении Северной Двины и в зоне смешения речных и морских вод // Вода: химия и экология. 2018. № 4–6. С. 75–85.
4. Градусов Б.П., Чижикова Н.П. Факторы и география глинистых минералов речного стока // Докл. РАН СССР. 1997. Т. 234. № 2. С. 425–428.
5. Ефимова Л.Е., Лебедев И.М., Цыцарин А.Г., Чернова Т.А. Гранулометрический состав взвесей в зонах смешения Белого, Азовского и Каспийского морей. М.: ВИНТИ, 2001. Депонент № 43–В 2001. 21 с.
6. Иванова А.М., Коновалов Г.С. О механическом и минералогическом составе взвешенных веществ некоторых рек Советского Союза // Гидрохим. материалы. 1971. Т. 55. С. 79–89.
7. Иглин С.М., Лещев А.В., Коробов В.Б. Оценка масштабов заносимости судоходного канала в морском порту Архангельска // Инженерные изыскания. 2019. Т. 13. № 1. С. 46–54.
8. Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В. и др. Особенности сезонного распределения взвеси и органического углерода по данным обсерватории “Маргинальный фильтр реки Северная Двина” // Океанологические исследования. 2018. Т. 46. № 2. С. 96–111.
9. Коченкова А.И., Новигатский А.Н., Гордеев В.В. Распределение взвеси в маргинальном фильтре Северной Двины в конце лета // Успехи современного естествознания. 2018. № 2. С. 106–112.
10. Кравчишина М.Д., Шевченко В.П., Филиппов А.С. и др. Вещественный состав водной взвеси устья реки Северной Двины (Белое море) в период весеннего половодья // Океанология. 2010. Т. 50. № 3. С. 396–416.
11. Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
12. Лисицын А.П. Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // Глобальные изменения природной среды. Новосибирск: СО РАН, Филиал “ГЕО”, 2001. С. 163–248.
13. Лисицын А.П. Геология Мирового океана в третьем тысячелетии — новые подходы, достижения и перспективы // Новые идеи в океанологии Т. II. Геология / Под ред. Виноградова М.Е., Лаппо С.С. М.: Наука, 2012. С. 7–66.
14. Лисицын А.П. Рассеянное осадочное вещество в геосферах Земли и системе Белого моря // Система Белого моря. Т. II. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера / Под ред. Лисицына А.П., Немировской И.А. М.: Научный мир, 2012. С. 19–48.
15. Лисицын А.П. Системные четырехмерные исследования рассеянного осадочного вещества в водной толще Белого моря: взаимодействия геосфер водосбора и акватории // Система Белого моря. Т. III. Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения. М.: Научный мир, 2013. С. 25–38.
16. Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И. и др. Взвесь и гидрооптика Белого моря — новые закономерности количественного распределения и гранулометрия. // Актуальные проблемы океанологии / Под ред. Лаврова Н.П. М.: Наука, 2003. С. 556–607.
17. Лисицын К.Н. Сток наносов в океан // Сток наносов, его изучение и географическое распределение. Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 78–92.
18. Лопатин Г.В. Наносы рек СССР. М.: Гидрометеиздат, 1952. 366 с.
19. Морозов Н.П., Батурич Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г. О составе взвеси и осадков устьевых районов Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби // Гидрохимические материалы. 1974. Т. 60. С. 60–73.
20. Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М.: Наука, 1967. 128 с.
21. Соколова Г.А., Кузнецов Н.Т., Клюканова И.А. Географические факторы формирования глинистого материала взвешенных наносов рек и ороситель-

- ных систем Средней Азии // Изв. АИ СССР. Сер. географ. 1978. № 2. С. 99–107.
22. Шамов Г.И. Речные наносы. Л., 1954. 346 с.
23. Degens E.T. Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers. Part 1. SCOPE/UNEP Sonderband. Hamburg, 1982. V. 52. 765 p.
24. Eisma D. Suspended matter in the aquatic environment. Berlin–Heidelberg: Springer–Verlag, 1993. 315 p.
25. Irion G. Clay mineralogy of the suspended load of the Amazon and of Rivers in the Papua-New Guinea mainland // Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers. Part 2 / Eds. Degens E.T. et al. SCOPE/UNEP Sonderband Hamburg 1983. P. 483–504.
26. Kempe S., Eisma D. Degens E. et al. Transport of Carbon and Nutrients in Lakes and Estuaries. Part 6. SCOPE/UNEP Sonderband. Hamburg, 1993. V. 74. 318 p.
27. Gibbs R. Mechanism controlling world water chemistry // Science. 1970. V. 170. № 3962. P. 1088–1090.
28. Konta J. Crystalline suspended particles in the Niger, Parana, Mackenzie and Waikato rivers // Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers Part 2 / Eds. Degens E.T., S. Kempe, H. Soliman – et al. SCOPE/UNEP Sonderband Hamburg, 1983. P. 505–523.
29. Konta J. Mineralogy and chemical maturity of suspended matter in major rivers sampled under the SCOPE/UNEP Project. // Transport of Carbon and Minerals in Major World Rivers. Part 3 / Eds. Degens E.T. et al. SCOPE/UNEP Sonderband Hamburg, 1985. P. 569–592.

## Seasonal Variations of the Grain-Size and Mineral Composition of Suspended Particulate Matter of the Severnaya Dvina River

V. V. Gordeev<sup>a, #</sup>, O. M. Dara<sup>a</sup>, T. N. Alekseeva<sup>a</sup>, A. I. Kochenkova<sup>a</sup>, A. G. Boev<sup>a</sup>,  
A. S. Lokhov<sup>a</sup>, S. K. Belorukov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: gordeev@ocean.ru*

The first results of the study of seasonal variations of the grain size and mineral compositions of the Severnaya Dvina river suspended matter are presented. The suspended matter samples were collected every month during 2016–2017 at the exit of the Kuznetchiha arm to the Dvinsky bay of the White Sea. The grain-size fractions were separated by water-mechanic method by Petelin with retention of fractions for the following investigations with help of electron microscope, energy-dispersion microanalyzer and X-ray diffractometer. The results demonstrated that the pelitic and subcolloidal fractions were prevailed in the grain-size spectrum of river suspended matter with subordinate role of more coarse fractions. Seasonal variations of suspended matter concentrations, the sum of detrital minerals and of clay minerals are under influence of river water discharge and achieved maximum in the periods of high water (spring flood and partly in the end of summer–autumn season of heavy rains). The subcolloidal fraction in March sample stands out in the fine fraction distribution. Its part in this sample was the highest one among of these fractions during the whole year. The reason of the fact is connected probably with the highest content of fine dispersed detrital minerals in the fraction. The question – why this is found in March? – is remained to be open.

**Keywords:** Severnaya Dvina, marginal filter, river suspended matter, grain size, mineralogy of suspended matter, seasonal variations