

## ГИДРОХИМИЯ И ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

УДК 551.465

### БЕЛОМОРСКИЙ СЕДИМЕНТОГЕНЕЗ

**А. Н. Новигатский, В. П. Шевченко, А. А. Клювиткин,  
М. Д. Кравчишина, Н. В. Политова**

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

Изучено морское осадконакопление с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. На основе многолетних исследований небольшого моря удалось установить новые закономерности осадочного процесса в условиях субарктической и арктической зон Северо-Запада России. Изучена месячная, сезонная, многолетняя динамика основных компонентов потоков рассеянного осадочного вещества. Представлена морская стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени, показано, что биогенная составляющая потока при переходе из рассеянных форм в концентрированные понижается на порядок. Рассчитаны средние значения вертикального потока: общее и по вкладам основных биогенных и терригенных компонентов на 1 м<sup>2</sup> дна и на всю площадь глубоководной части Белого моря.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** Белое море; седиментогенез; седиментационные ловушки; вертикальные потоки осадочного вещества; донные осадки.

**A. N. Novigatsky, V. P. Shevchenko, A. A. Klyuvitkin, M. D. Kravchishina,  
N. V. Politova. SEDIMENTOGENESIS IN THE WHITE SEA**

Marine sedimentation was studied using dispersed sedimentary material of the water column in sedimentation traps in comparison with the surface layer of bottom sediments. Long-term studies of a small sea have enabled identification of new regularities in the sedimentary process in the Subarctic and Arctic zones of Northwest Russia. The monthly, seasonal, and long-term dynamics of the main components of the streams of dispersed sedimentary matter were studied. The chronology of the marine stage of sedimentation of the main components of dispersed sedimentary matter is presented; it is shown that the biogenic component of the flux decreases by an order of magnitude upon transition from dispersed forms to concentrated ones. The average values of the vertical fluxes were calculated: the total, and by the contributions of the main biogenic and terrigenous components per 1 m<sup>2</sup> of the bottom and over the entire deep-water area of the White Sea.

**Key words:** White Sea; sedimentogenesis; sedimentation traps; vertical flux of sediment; bottom sediments.

## Введение

Рассеянная форма осадочного вещества широко распространена в природе, но малоизучена. Эта форма дисперсного осадочного вещества существует практически во всех геосферах – аэрозоли в атмосфере, гидрозоли в морской и пресной воде, криозоли во льдах и снеге [Lisitzin, 2010]. Она существует и в местах подводных извержений – гидротермальной деятельности срединно-океанических хребтов (дымы «курильщиков»), в незначительных количествах поступает из космоса (космическая пыль). Важную роль в образовании золь играют организмы-продуценты (диатомовые, кокколитофориды и др.), которые создают биогенную взвесь, и организмы-фильтраторы, которые используют эту тонкую взвесь и мелкий биогенный детрит для питания (зоопланктон и бентос) [Lisitzin, 2004]. Рассеянные формы осадочного вещества на континентах связаны с процессами физического и химического выветривания горных пород и в значительной мере – с макроорганизмами и растительностью (споры и пыльца при цветении растений, микрочастицы при распаде растительного вещества). Многие важные особенности образования, переноса (транспортировки) осадочного вещества в рассеянной и растворенной его формах до настоящего времени почти не изучены. Изучались в основном только их концентраты: донные осадки океанов, морей, озер [Rachold et al., 2004; Stein, 2008; Romankevich et al., 2009]. Водная взвесь – единственный источник формирования донных осадков, главный источник пищи глубоководных организмов. Общей особенностью осадочного материала всех геосфер является незначительное содержание в среде и размеры. Как и бактерии (биогенная часть взвеси), осадочный материал практически не различается невооруженным глазом. Характерны также его подвижность, очень широкое региональное и глобальное распространение, тонкость частиц (в основной части 1–100 мкм), тесная связь с условиями среды, взаимодействие по путям переноса [Lisitzin, 2004, 2010].

Рассеянные формы осадочного вещества – главный источник пелагических донных осадков; они обнаружены во всех геосферах и перемещаются в соответствии с динамикой среды. Принципиально новые данные о процессах осадкообразования получены прямыми методами определения вертикальных (и наклонных) потоков осадочного вещества (седиментационные ловушки, изотопные методы и др.) [Lein et al., 2012; Lisitzin et al., 2014, 2015a, b, 2017; No-

vigatsky et al., 2020]. Для седиментологии наибольший интерес представляет метод седиментационных ловушек [Honjo, Doherty, 1988; Wefer, Fischer, 1991; Lukashin et al., 2011]. Это конусы или цилиндры, в нижней части которых установлены приемные флаконы, собирающие рассеянный осадочный материал. Смена флаконов производится микропроцессором, т. е. экспозиции улавливания вещества могут устанавливаться от одних суток до месяцев, сезонов, лет. Мы ведем отбор вещества на разных глубинах обычно с экспозицией 1 месяц и сменной станций один раз в год. Таким образом удастся получить непрерывный во времени ряд проб с месячными экспозициями (дифференциальные потоки) и годовыми экспозициями (интегральные потоки) на Белом море, в Арктике и разных природных зонах океанов. Опорные станции, снабженные не только ловушками, но и измерителями течений, прозрачномерами, самописцами, установленными на разных глубинах на вертикальном тросе с якорем, называют автоматическими глубинными седиментационными обсерваториями (АГОС) [Lisitzin et al., 2014; Novigatsky et al., 2018a, b].

Северный Ледовитый океан – океанический бассейн с сильно выраженной сезонностью осадконакопления. Такие параметры, как площадь развития морских льдов, твердый и жидкий сток рек, абразия берегов, первичная продукция, температуры поверхностной водной массы и приводного слоя атмосферы, демонстрируют ярко выраженную сезонность. Последние годы мы проводили детальные исследования по взаимодействию рассеянного и растворенного вещества на региональном и локальном уровнях в характерном водоеме арктической и субарктической зон – в Белом море. Большую часть года это море покрыто дрейфующими льдами, а придонные его воды имеют температуру  $-1,4^{\circ}\text{C}$  круглый год, т. е. здесь обстановка соответствует условиям зон ледовой седиментации [Lisitzin, 2002; Levitan, 2015].

Скорости седиментации донных осадков Мирового океана меняются в широких пределах от менее 1 до 1000 и более мм/год. На континентальных окраинах Северного Ледовитого океана (СЛО) встречаются значения порядка 10 мм/год (в депоцентрах зон смешения речных и морских вод, пр. Фрама и некоторых фьордах), нередко нулевые и даже отрицательные значения в зонах донной эрозии (участки дна Белого, Баренцева, Карского и других морей) при средней скорости осадконакопления в пелагиали СЛО 0,01 мм/год [Rachold et al., 2004; Stein, 2008; Levitan, 2015].

Таким образом, океан – главный уловитель рассеянного осадочного вещества всех геосфер, внешних и внутренних, т. е. это глобальный самописец геосфер планеты (процессов, событий на континентах и в водах океанов). Взаимодействие геосфер особенно активно идет на двух батиметрических уровнях: на поверхности для внешних геосфер и в придонном слое – верхней части осадочной толщи. К этим двум видам осадочного материала в морях и океанах добавляется еще рассеянное вещество, образующееся в море, – биогенное ( $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + \text{C}_{\text{орг}}$ ) [Lisitzin, 2004; Wassmann et al., 2004]. В процессе смешения осадочного вещества всех геосфер (его растворенных и взвешенных форм) происходит не только образование, но и преобразование этих видов осадочного вещества, их неоднократное взаимодействие, смешение по мере осаднения, так что в донные осадки попадает осадочный материал, прошедший различные превращения на пути от поверхности до дна океана [Lisitzin, 2010]. Все эти превращения удастся изучать в пробах взвеси от поверхности до дна, а затем в донных осадках.

## Материалы и методы

В рамках программы ИО РАН «Система Белого моря» впервые в Белом море в течение 15 лет проводили непрерывные прямые исследования осадочных процессов не только в донных осадках, но и в толще вод посредством мембранной ультрафильтрации взвеси, а также с помощью АГОС с ежемесячным прямым количественным определением вертикальных потоков и непрерывным отбором вещества с разных глубин круглый год. Это позволяет получить прямые данные о количественной концентрации (мг/л), скорости осаднения (мм/год) и вертикальных потоках (мг/м<sup>2</sup>/сут), т. е. абсолютных массах рассеянного осадочного вещества в придонном слое вод и верхнем слое донных осадков, его изменениях в ходе осаднения от поверхности до дна, причем непрерывно во времени [Lisitzin et al., 2014, 2015a, b; Novigatsky et al., 2018b, 2020].

Метод седиментологических обсерваторий мы совмещаем обычно с непрерывными спутниковыми наблюдениями для поверхностного слоя вод, рейсовыми океанологическими и геологическими исследованиями донных осадков (пробы из мультикорера) на станциях (рис. 1). Такие исследования методом АГОС с непрерывным изучением рассеянного вещества в толще вод Белого моря (0–300 м) в сопоставлении с донными осадками удалось вы-

полнить в 2000–2014 гг. на мегаполигоне Белое море (рис. 1).

Другой независимый метод количественного изучения осадочного вещества в толще вод (концентрация, мг/л) – метод мембранной ультрафильтрации (выделение частиц крупнее 0,45 мкм). Этот метод дает картину распределения вещества только для момента работ на станции (одномоментный). Обычно дискретный отбор проб батометрами предваряют непрерывным вертикальным зондированием прозрачности и других параметров, что открывает возможность отбора проб не формально (по горизонтам), а в наиболее важных местах. Для самого верхнего слоя (0–5 м) используют также спутниковые данные (сканер MODIS-Aqua) для всего времени работ спутников, т. е. круглогодичные [Kravchishina et al., 2015, 2018].

Таким образом, сочетание спутниковых наблюдений с верификацией и контролем прямыми дискретными определениями содержания взвешенного вещества на станциях позволяет получить картину распределения взвеси (мг/л) для всего поверхностного слоя на момент экспедиционных исследований и распространить это для взвешенного осадочного вещества и его биологической части (по хлорофиллу) уже по спутниковым данным на большую часть года.

Осаждающийся осадочный материал состоит в основном из биогенных и литогенных компонентов. Биогенные компоненты представлены органическим веществом (ОВ), карбонатным материалом, биогенным опалом; литогенные – обломочными и глинистыми минералами, реже вулканогенными пеплами. Индикаторы этих компонентов для ОВ –  $\text{C}_{\text{орг}}$  ( $\text{C}_{\text{орг}} \cdot 2 = \text{ОВ}$ ) [Lukashin et al., 2000], для кремнистых панцирей –  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ , для карбонатных –  $\text{CaCO}_3$ , для литогенного материала – Al,  $\text{Si}_{\text{вал}}$  [Lukashin et al., 2003]. Скорости современного осадконакопления в Белом море в верхнем слое осадков (0–20 см) определяли с помощью радионуклидного анализа ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) [Aliev et al., 2007].

## Результаты и обсуждение

В настоящей работе описан новый подход к пониманию современных процессов седиментации в морях и океанах с использованием разработанного в ИО РАН метода АГОС. Этот метод позволяет изучать рассеянное осадочное вещество не только в обычных для океанологии трех измерениях (широта, долгота, глубина), но и во времени (от месяцев и сезонов до десятков лет), в том числе при переходе осадочного вещества из рассеянной (взвесь)

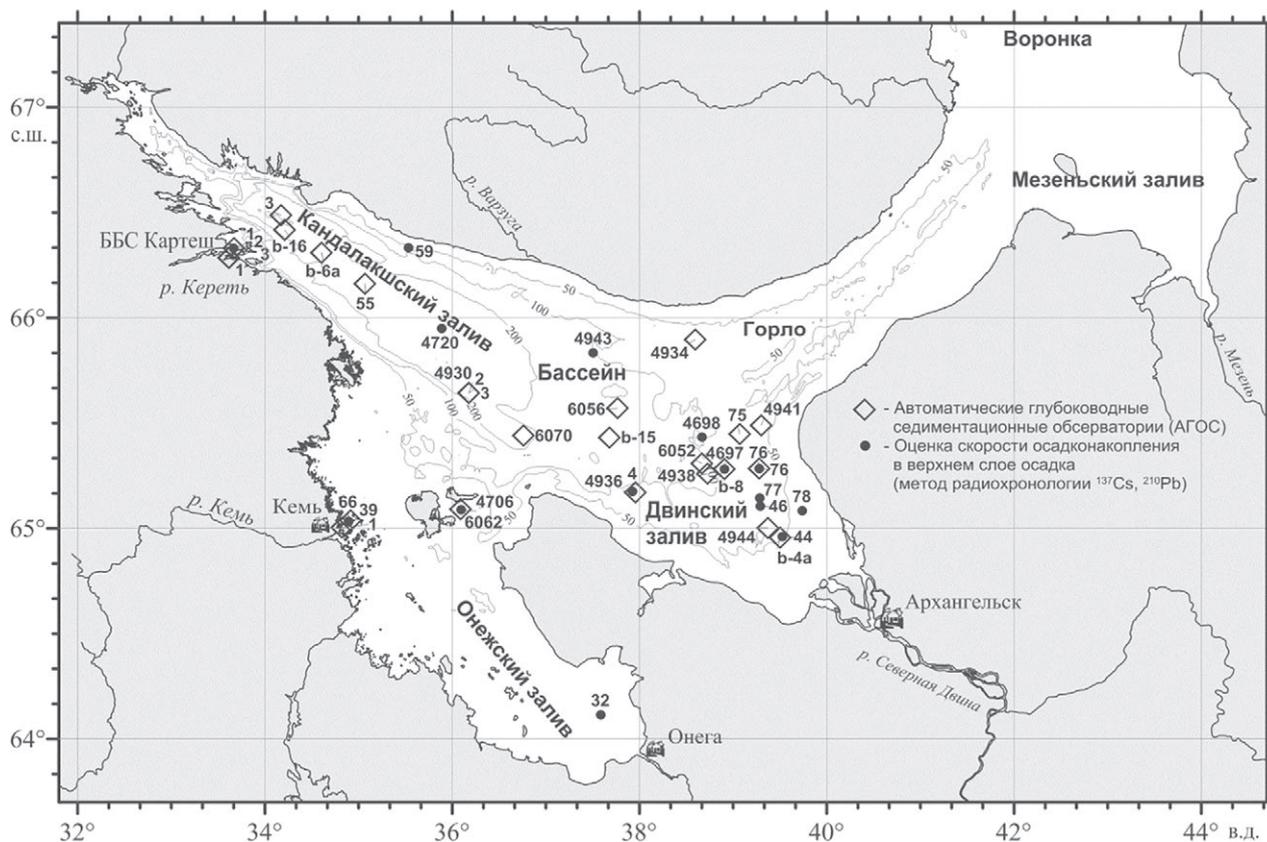


Рис. 1. Положение автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий (АГОС) в Белом море с седиментационными ловушками и измерителями течений с параллельным изучением взвеси и донных осадков с оценкой скорости седиментации по верхнему слою донных осадков (метод радиохронологии  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 1. Position of automatic deep-water sedimentation observatories (ADOS) in the White Sea with sedimentation traps and current meters with a parallel study of suspended matter and bottom sediments with an estimate of the sedimentation rate along the upper layer of bottom sediments ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  radio chronology method) [Novigatsky et al., 2020]

в концентрированную форму (донные осадки) с резким изменением реологии [Novigatsky et al., 2018b, 2020].

*Сезонная изменчивость месячных значений потоков осадочного вещества и среднемесячных значений концентрации взвеси*

После весеннего таяния льда и вскрытия рек в моря Арктики начинают поступать основные порции осадочного материала с площади речного водосбора [Gordeev, 2006; Kravchishina et al., 2010]. Параллельно с этим процессом под снежно-ледовым покровом и у кромки льда вследствие высокой солнечной активности в сочетании с поступлением растворенных биогенных элементов речного стока и талого морского льда, аккумулирующего аэрозольный и другой осадочный материал всю зиму, происходит весенняя вспышка цветения фитопланктона [Ilyash et al., 2011, 2013] и одновре-

менно бурное развитие бактерий (максимум зоопланктона следует немного позже). В морях Арктики, а также и в Белом море, в связи с этим происходит резкий сезонный скачок концентрации взвеси [Kravchishina et al., 2015] и, как следствие, увеличение в несколько раз значений вертикальных потоков осадочного вещества с поверхности на дно моря (рис. 2).

На рис. 2 представлены месячные значения вертикальных потоков, полученные нами с 2000 г. Резкие максимумы потоков приурочены к областям эстуариев и заливов, где преобладающее влияние на поставку осадочного материала имеет материковый сток [Shevchenko et al., 2005, 2010]. Своего максимума потоки осадочного вещества достигают в июне, превышая значение  $1000 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$  (ст. 3 – Канда-лакшский залив, ст. 75 – Двинский залив).

Летняя межень (середина июля – август) в Белом море характеризуется относительно низкими значениями потоков, которые в среднем составляли не более  $200 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$  (ст. 75,

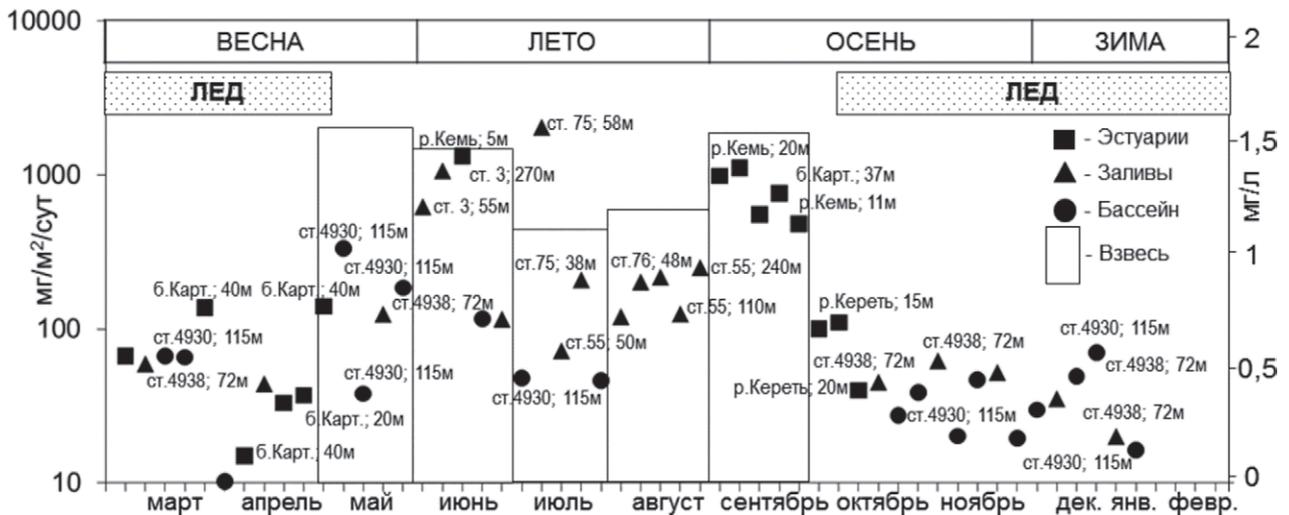


Рис. 2. Сезонная динамика месячных значений потоков осадочного вещества ( $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ ) и среднемесячных значений концентрации взвеси ( $\text{мг}/\text{л}$ ) в самой верхней части деятельного слоя, по данным спутникового сканера MODIS-Aqua [Kravchishina et al., 2015], в Белом море [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 2. Seasonal dynamics of monthly values of sedimentary matter fluxes ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{day}$ ) and monthly average values of suspension concentration ( $\text{mg}/\text{L}$ ) in the uppermost part of the active layer according to the MODIS-Aqua satellite scanner [Kravchishina et al., 2015] in the White Sea [Novigatsky et al., 2020]

76 – Двинский залив; ст. 55 – Кандалакшский залив; рис. 2).

В конце летнего сезона – начале осени структура планктонного сообщества снова перестраивается, идет бурный рост мезопланктона, эврифагов и крупного зоопланктона [Pertsova, Kosobokova, 2000]. Осенние паводки также вносят существенный вклад в увеличение концентраций взвеси, что напрямую отражается на величинах потока и составе осадочного вещества (рис. 2). На это в первую очередь реагируют эстуарные области, где значения потоков осадочного вещества достигают  $1000 \text{ мг}/\text{м}^2/\text{сут}$  (р. Кемь, биологическая станция Картеш).

В конце осени солнечная активность снижается, планктонные сообщества мигрируют на большие глубины (зимовка) [Pertsova, Kosobokova, 2000], речной сток перестраивается на режим зимней межени, начинается ледостав. Концентрация взвеси в этот период в арктических морях незначительна, соответственно, минимальны и потоки осадочного вещества (рис. 2).

Относительное увеличение потоков осадочного вещества можно наблюдать в декабре (рис. 2); вероятно, это связано со сменой гидрологического режима Белого моря и, как следствие, разрушением пикноклина. По данным М. Д. Кравчишиной [Kravchishina et al., 2015], скачок плотности (пикноклин) аккумулирует значительное количество взвеси. При замерзании льдов отжимаются рассолы, которые опускаются на глубину, это явление отражается в относительно повышенных величинах потока

взвешенного осадочного вещества в декабре, что мы подробно описали в [Lisitzin et al., 2015b]. Зимние подледные вертикальные потоки осадочного вещества характеризуются самыми низкими значениями, которые не превышают  $70 \text{ мг}/\text{м}^2/\text{сут}$  (ст. 4930 – Бассейн; рис. 2). Это связано с ослаблением солнечной радиации и полным ее прекращением в полярную ночь.

Таким образом, наблюдается ярко выраженная сезонная и месячная изменчивость потоков рассеянного осадочного вещества в Белом море – меняются в толще вод их количество, состав, свойства. Максимальные значения концентраций ( $\text{мг}/\text{л}$ ) и потоков ( $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ ) характерны для безледного весенне-летнего периода, минимальные свойственны зимнему периоду, когда море и питающий водосбор покрыты снежно-ледовым покровом, а речной и эоловый сток незначительны. При смене гидрометеорологического режима возникают сезонные изменения потоков рассеянного осадочного вещества, повторяющиеся из года в год (повышенное содержание потоков в декабре, ледовая разгрузка в апреле, майская вспышка цветения фитопланктона и половодье). Месячные, сезонные и годовые потоки рассеянного осадочного вещества во времени могут различаться между собой в несколько раз, особенно в весенний сезон, когда существенное влияние на величину потока оказывает ледовый режим акватории: ковровая снежно-ледовая разгрузка осадочного вещества – криозоля, речной сток, а также абразия, цветение фитопланкто-

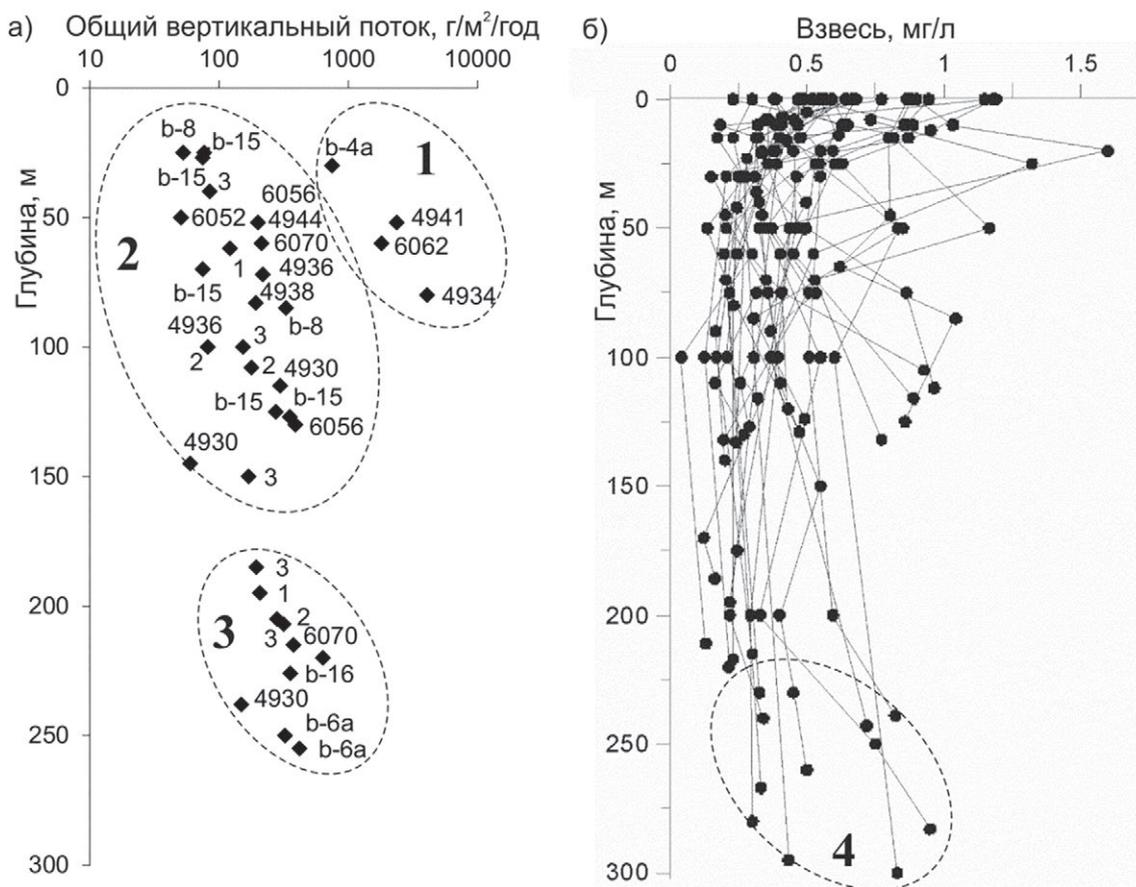


Рис. 3. Соотношение величин (а) интегральных вертикальных потоков ( $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ ) и (б) взвеси ( $\text{мг}/\text{л}$ ) в Белом море с глубиной (0–300 м): 1 – область высоких и сверхвысоких величин потока; 2 – область величин потока под пикноклином; 3 – область придонных величин потока; 4 – повышенные значения взвеси в придонном нефелоидном слое [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 3. Ratio of values (a) integral vertical fluxes ( $\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$ ) and (б) suspended particulate matter ( $\text{mg}/\text{L}$ ) in the White Sea with a depth (0–300 m): 1 – region of high and ultrahigh fluxes values; 2 – area of fluxes values under the pycnocline; 3 – area of bottom fluxes values; 4 – increased values of suspended matter in the bottom nepheloid layer [Novigatsky et al., 2020]

на. Потоки осадочного материала на дно напрямую зависят от взаимодействия вещества, поступающего из внешних геосфер.

#### Годовые интегральные потоки рассеянного осадочного вещества

В ходе работ мы выделили два структурных фронта в Белом море: Северный, где через Горло поступают воды из Баренцева моря и уходят из Белого моря (Северодвинское течение), т. е. это область смешения вод, и Южный фронт близ Соловецких островов [Lisitzin et al., 2014]. Указанные фронтальные зоны характеризуются повышенными по сравнению с другими частями моря концентрациями и потоками рассеянного вещества (взвеси). Здесь, кроме того, высокая интенсивность приливо-отливных течений. Именно здесь проявлены макси-

мальные для моря среднегодовые значения потоков на трех станциях (6062, 4934, 4941): 4082–1814, в среднем 2758  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$  (рис. 3, а).

Другие части Белого моря (Бассейн, Двинский, Кандалакшский заливы) характеризуются более низкой приливо-отливной энергией и более низкими концентрациями и потоками рассеянного осадочного вещества. Средняя величина потоков осадочного вещества в море (за исключением аномалий двух фронтов) – 234  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ , т. е. на порядок меньше, чем во фронтальных зонах. Минимальные потоки обнаружены в центральной части моря в Бассейне – 51  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ , а средние многолетние для глубоководной части Белого моря – 213  $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ , что близко к другим определениям для Арктики [Fahl, Nöthig, 2007; Lalande et al., 2014].

Повышены потоки осадочного вещества в заливах Белого моря – Двинском и Канда-

лакшском, в особенности в областях их маргинальных фильтров (зоны смешения речных и морских вод) [Lisitzin et al., 2014, 2015b]. Так, средняя многолетняя величина потока для Двинского залива – 243 г/м<sup>2</sup>/год, а в Кандалакшском заливе – 367 г/м<sup>2</sup>/год для открытых их частей. Таким образом, маргинальные фильтры – это вторая область повышенных значений потоков осадочного вещества.

Третья область повышенных значений содержания взвеси и потоков – придонная (от поверхности дна до 100 м над дном, а иногда и больше). Здесь основную роль играют придонные течения, изученные на нескольких станциях на протяжении ряда лет. Главное значение для динамики в Белом море имеют полусуточные приливы с местными отклонениями, связанными с конфигурацией дна и берегов. При уменьшении глубины амплитуда приливно-отливных течений растет. Скорости возникающих течений бывают достаточными для размыва наилка (жидкий верхний слой осадков), что напрямую подтверждается наблюдениями за концентрацией взвеси и прозрачностью вод придонного слоя. Данные зондирования и мембранной фильтрации показали возникновение слоев и линз вод повышенной мутности (нефелоидов) – четвертая область (рис. 3, б) [Lukashin et al., 2000, 2003].

Прямые измерения придонных течений в Бассейне показали доминанту восточного вектора с изменениями направления на обратное без вращения. В среднем для года результирующие течения составляют около 1,5 см/с с изменениями до 2–20 см/с [Novigatsky et al., 2018b]. Интересной также оказалась связь величин потоков с глубиной (рис. 3, а). Высокие значения отмечены над пикноклином и на пикноклине (рис. 3, а, область 1), они снижаются на шельфе (0–200 м) и вновь растут на склоне (рис. 3, а, область 3).

Впервые количественно изучены вертикальные потоки осадочного вещества во всей акватории Белого моря методом АГОС. Получены новейшие данные о ходе осадочного процесса в толще вод от поверхности моря до верхнего слоя донных осадков. Метод АГОС открывает новые возможности для океанологии, седиментологии, геохимии и биологии – непрерывные наблюдения во времени от суток до десятков лет.

#### *Скорости современной седиментации и абсолютные массы*

Полученные нами значения по <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs показывают скорости осадконакопления для всего Белого моря 0,4–4,2 мм/год. В пересчете

на абсолютные массы сухого осадка эти значения отвечают интервалу 93–1260 при среднем около 310 г/м<sup>2</sup>/год (табл. 1). Этому не противоречат данные о скоростях осадконакопления в прибрежных участках Кандалакшского залива Белого моря 0,3–1,0 мм/год [Mityaev et al., 2012], в море Бофорта 1,4 мм/год [Bringué, Rochon, 2012] и другие определения по Арктике [Stein, 2008; Levitan, 2015].

Прямые количественные данные по потокам осадочного вещества в придонных горизонтах Белого моря, полученные с помощью седиментационных ловушек на обсерваториях АГОС за 15 лет, дали значения 149–1814 при среднем 335 г/м<sup>2</sup>/год (табл. 1).

Более низкие значения абсолютных масс верхнего слоя донных осадков в сравнении с придонными потоками (при их сравнении в сходных единицах), очевидно, связаны с деградацией органического вещества и всей биогенной триады во время нахождения вещества в самом верхнем слое (наилке). Это подтверждается исследованиями по органическому веществу [Politova et al., 2016], где показано, что при длительном пребывании частиц в самом верхнем слое осадка происходит потребление органического углерода бентосом и бактериями (выедание), а также частичное растворение других компонентов биогенной триады (CaCO<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub><sup>заморф</sup>).

Наиболее высокие значения скоростей осадконакопления и потоков осадочного вещества выявлены на границе река-море (реки Северная Двина, Онега, Кемь), т. е. в маргинальных фильтрах рек, а также вдоль стокового течения р. Северной Двины в Двинском заливе (рис. 1). Кроме того, высокие скорости осадконакопления обнаружены в глубоководных участках Бассейна, Кандалакшского и Двинского заливов в областях депрессий дна (Кандалакшский грабен и др.), они связаны со сложными склоновыми процессами (мутьевые потоки, гравититы и др.) на дне моря [Novigatsky et al., 2018b].

Более высокие значения придонных потоков осадочного вещества встречены на ст. 6062 (между о. Большой Соловецкий и о. Анзерский): они в несколько раз превышают скорости осадконакопления в этой области. Район испытывает интенсивную гидродинамическую нагрузку – полусуточные приливные циклы Белого моря, что выражается в доминировании латерального вектора переноса осадочного вещества над обычным вертикальным. Суммарный результирующий вектор скорости латерального движения придонных водных масс Белого моря в течение года в среднем состав-

Таблица 1. Придонные вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества и оценка скорости осадконакопления в верхнем слое осадка в Белом море [Novigatsky et al., 2020]

Table 1. Bottom vertical fluxes of dispersed sedimentary matter and an estimate of the sedimentation rate in the upper sediment layer in the White Sea [Novigatsky et al., 2020]

Придонные вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества Bottom vertical fluxes of dispersed sedimentary matter					
Станция Station	Широта (с. ш.) Latitude (N)	Долгота (в. д.) Longitude (E)	Глубина, м Depth, m	Горизонт, м Horizon, m	Величина придонного потока, г/м <sup>2</sup> /год Bottom fluxes values, g/m <sup>2</sup> /year
b-16	66°34'	33°47'	236	226	357
b-4a	64°57'	39°31'	50	30	752
b-8	64°35'	39°01'	96	85	330
b-15	65°26'	37°40'	132	125	276
b-15	65°26'	37°40'	132	127	354
b-6a	66°09'	35°03'	267	250	325
b-6a	66°09'	35°03'	267	255	421
6056	65°34'	37°45'	139	130	390
6062	65°05'	36°05'	70	60	1814
6070	65°26'	36°45'	229	220	639
4930	65°38'	36°10'	255	238	149
2 (4930)	65°38'	36°09'	249	207	317
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	185	195
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	195	208
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	205	282
3 (4930)	65°38'	36°07'	255	215	378
4944	65°00'	39°22'	67	52	201
4938	65°15'	38°43'	117	72	219
4936	65°10'	37°57'	97	83	193
Среднее геометрическое Geometric mean					335
Минимум Minimum					149
Максимум Maximum					1814
Стандартное отклонение Standard deviation					372
Оценка скорости осадконакопления в верхнем слое осадка (метод радиохронологии <sup>210</sup> Pb and <sup>137</sup> Cs) Estimate of the sedimentation rate in the upper sediment layer ( <sup>137</sup> Cs, <sup>210</sup> Pb radio chronology method)					
Станция Station	Широта (с. ш.) Latitude (N)	Долгота (в. д.) Longitude (E)	Глубина, м Depth, m	Скорость осадконакопления, мм/год Sedimentation rate, mm/year	Абсолютные массы*, г/м <sup>2</sup> /год Absolute masses*, g/m <sup>2</sup> /year
4697	65°17'	38°55'	96	0,40	120
4698	65°25'	38°40'	107	0,79	237
4706	65°05'	36°06'	66	0,85	255
4720	65°57'	35°53'	290	2,2	660
32	64°07'	37°35'	16	2,7	810
78	65°05'	39°44'	32	4,2	1260
66	65°02'	34°53'	21	0,82	246
76	65°17'	39°16'	68	0,91	273
77	65°08'	39°17'	76	0,31	93
59	66°20'	35°32'	81	0,62	186

Окончание табл. 1  
Table 1 (continued)

Станция Station	Широта (с. ш.) Latitude (N)	Долгота (в. д.) Longitude (E)	Глубина, м Depth, m	Скорость осадконакопления, мм/год Sedimentation rate, mm/year	Абсолютные массы*, г/м <sup>2</sup> /год Absolute masses*, g/m <sup>2</sup> /year
3	66°20'	33°40'	62	0,51	153
4943	65°50'	37°30'	116	0,69	207
44	64°58'	39°31'	54	2,6	780
46	65°06'	39°17'	73	1,1	330
4	65°10'	37°56'	88	1,7	510
Среднее геометрическое Geometric mean				1,0	310
Минимум Minimum				0,40	93
Максимум Maximum				4,2	1260
Стандартное отклонение Standard deviation				1,1	332

\*При средней плотности сухого осадка (0–20 см) 0,3 г/см<sup>3</sup>.  
\*With an average density of dry sediment (0–20 cm) 0.3 g/cm<sup>3</sup>.

ляет 1,5 см/с и не создает существенных препятствий для осаждения под действием силы тяжести [Novigatsky et al., 2018b]. Кроме того, на отдельных станциях выделяются участки быстрой и сверхбыстрой седиментации в устьевых (ст. б-4а) и склоновых (ст. 6070 и 3) областях.

Таким образом, удалось применить новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. Такой подход открывает возможность инситу (по потокам осадочного вещества в толще вод) изучать современную седиментацию в поверхностных слоях донных осадков и на новом технологическом уровне проследить изменения природной среды и климата.

#### *Динамика основных компонентов потока осадочного вещества*

На рис. 4 представлен месячный и сезонный ход основных компонентов рассеянного осадочного вещества в Белом море. Отчетливо выделяется высокая доля литогенной части на протяжении года. Это характерная особенность внутриконтинентальных морей. Кроме того, литогенная составляющая потока существенно доминирует в зимний сезон, когда акватория покрыта снежно-ледовым покровом, значительно лимитирующим процессы морского фотосинтеза и, соответственно, биогенную составляющую потока.

Для биогенной части значимую долю в вертикальном потоке ОБ составляют планктонные водоросли, вклад которых может достигать 90 % [Ilyash et al., 2013]. К основным особенностям Белого моря, отрицательно влияющим на развитие карбонатных организмов, следует отнести отсутствие теплых течений, слабый водообмен с океаном, длительность ледового покрова, большой приток пресных вод и низкую первичную продукцию фитопланктона. В Белом море преобладают морские виды диатомовых (до 70 %) с кремнистым скелетом, пресноводные формы находятся в подчиненном положении и встречаются обычно только в заливах с речным стоком [Ilyash et al., 2011]. Своих максимальных значений биогенные компоненты потока достигают в безледный период (рис. 4), однако высокие значения ОБ встречаются и в зимние месяцы, что связано с поступлением обогащенных биогенными элементами баренцевоморских вод, а также зимней миграцией зоопланктона в придонные горизонты [Pertzova, Kosobokova, 2000].

Обращают на себя внимание лавинные скорости седиментации в весенне-летний сезон (рис. 4, а, б). Это явление типично для морей Арктики и обусловлено наложением нескольких процессов поступления осадочного вещества – таяние снежно-ледяного покрова, бурное цветение планктона, половодье [Lisitzin et al., 2015b].

На рис. 5 показана морская стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени, где материал с месячной экспозицией (взвесь) получен

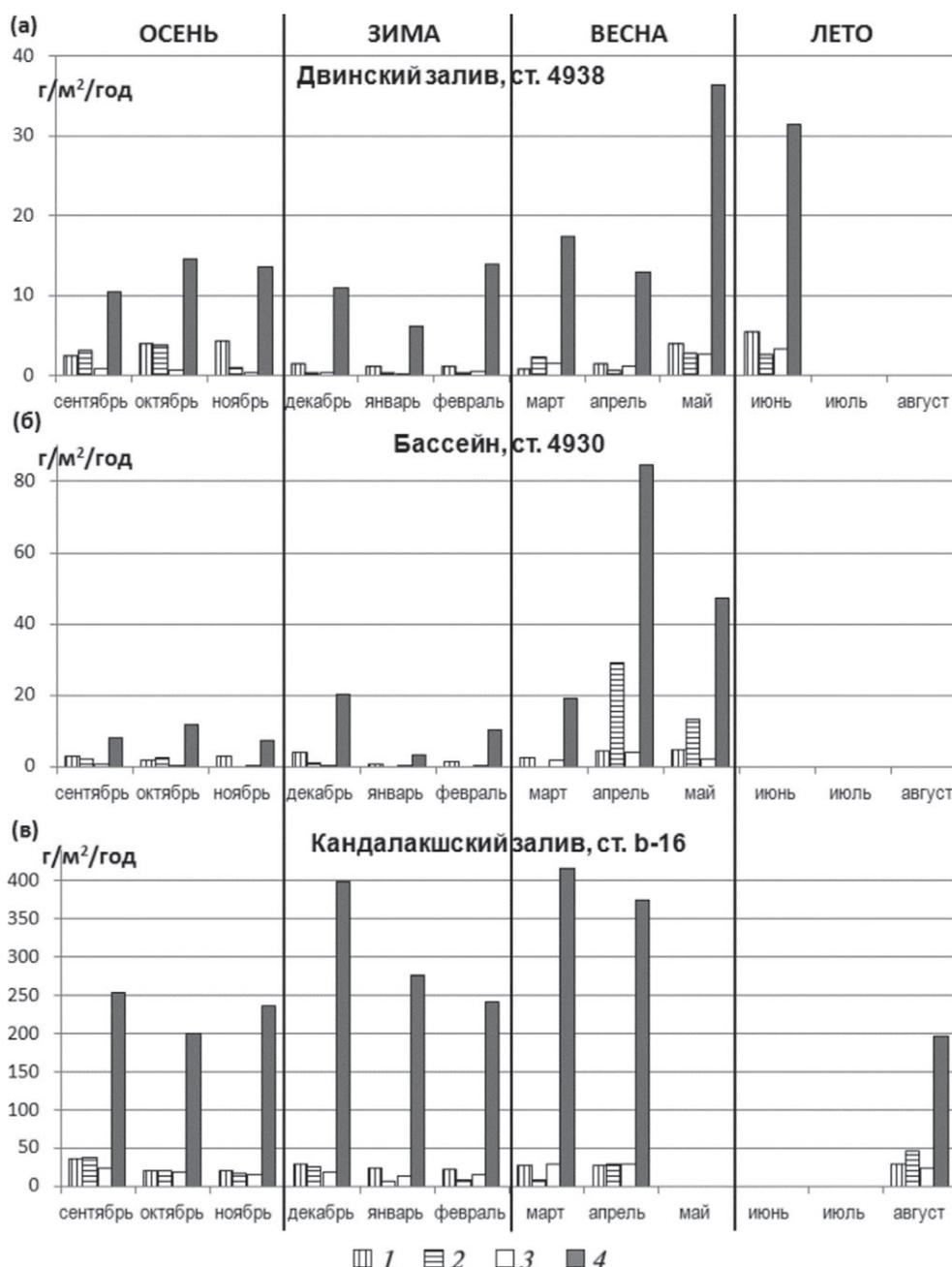


Рис. 4. Изменения главных компонентов вертикальных потоков (г/м<sup>2</sup>/год) в толще вод Белого моря по месяцам и сезонам, полученные в разных частях акватории с помощью седиментационных ловушек в составе АГОС: (а) – Двинский зал. (ст. 4938, глубина 117 м, горизонт постановки 72 м); (б) – Бассейн (ст. 4930, глубина 255 м, горизонт постановки 145 м); (в) – Кандалакшский зал. (ст. b-16, глубина 236 м, горизонт постановки 226 м). 1 – органическое вещество (ОВ), 2 – SiO<sub>2am</sub>, 3 – CaCO<sub>3</sub>, 4 – литогенная часть. Положение АГОС – см. рис. 1 [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 4. Changes in the main components of vertical fluxes (g/m<sup>2</sup>/year) in the water column of the White Sea by months and seasons, obtained in different parts of the water area using sedimentation traps within the ADOS: (a) – Dvinsky Bay (station 4938, depth 117 m, setting horizon 72 m); (б) – Basin (station 4930, depth 255 m, setting horizon 145 m); (в) – Kandalaksha Bay (station b-16, depth 236 m, setting horizon 226 m). 1 – Organic matter, 2 – SiO<sub>2bio</sub>, 3 – CaCO<sub>3</sub>, 4 – lithogenic part. ADOS position – see Fig. 1 [Novigatsky et al., 2020]

во время судовых работ, материал с годовой экспозицией получен с помощью седиментационных ловушек в составе АГОС, а материал с многолетней экспозицией – прецизионным

отбором поверхностного слоя донных осадков мультикорером [Lisitzin et al., 2017]. В осадочном материале с годовой экспозицией отчетливо фиксируется уменьшение доли биогенной

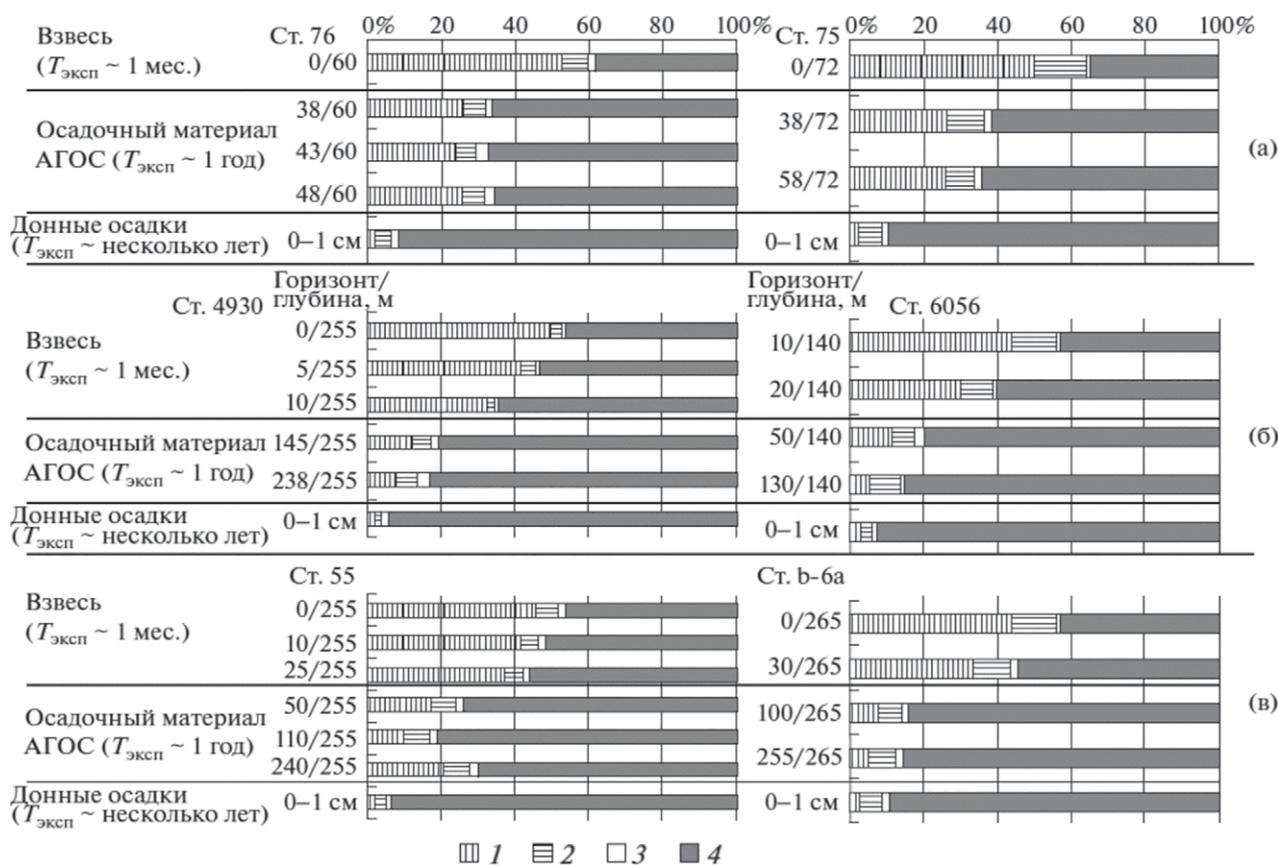


Рис. 5. Морская стадия седиментации основных компонентов (%) рассеянного осадочного вещества во времени, полученных методом АГОС: (а) – Двинский зал.; (б) – Бассейн; (в) – Кандалакшский зал. 1 – органическое вещество (ОВ), 2 – SiO<sub>2ам</sub>, 3 – CaCO<sub>3</sub>, 4 – литогенная часть [Novigatsky et al., 2020]

Fig. 5. The marine stage of sedimentation of the main components (%) of dispersed sedimentary matter in time, obtained by the ADOS method: (a) – Dvinsky Bay; (б) – Basin; (в) – Kandalaksha Bay. 1 – Organic matter, 2 – SiO<sub>2bio</sub>, 3 – CaCO<sub>3</sub>, 4 – lithogenic part [Novigatsky et al., 2020]

составляющей в несколько раз по отношению к месячной экспозиции, а в материале с многолетней экспозицией доля биогенной составляющей уменьшается уже на порядок, поскольку основным источником энергии биохимических процессов при переходе рассеянных форм в концентрированные выступает ОВ, поступающее из взвеси, и восстановленные соединения, поступающие из осадков [Politova et al., 2016; Demina et al., 2018]. Кроме того, в этих сложных биогеохимических процессах активно участвуют микроорганизмы, которые отвечают за преобразование ОВ морской взвеси в ОВ донного осадка, особенно на начальном этапе осадкообразования [Lein et al., 2012].

По данным многолетних исследований АГОС нам удалось рассчитать поступление и среднее содержание основных компонентов потока рассеянного осадочного вещества в Белом море (табл. 2). В литературе встречены попытки оценить потоки углерода по первичной продукции [Berger, Primakov, 2007] и спутниковым данным

[Vetrov, Romankevich, 2014], однако прямых определений на разных горизонтах водного столба по всей акватории до сегодняшнего дня не проводили.

Таким образом, показано, что биогенная составляющая потока при переходе из рассеянных форм в концентрированные понижается на порядок. Рассчитаны средние значения вертикального потока: общее и по вкладам основных биогенных и терригенных компонентов на 1 м<sup>2</sup> дна и на всю площадь глубоководной части Белого моря.

## Заключение

Впервые количественно изучены вертикальные потоки осадочного вещества во всей акватории Белого моря методом АГОС. Получены новейшие данные о ходе осадочного процесса в толще вод моря от поверхности моря до верхнего слоя донных осадков. Метод АГОС открывает новые возможности для океанологии,

Таблица 2. Среднее значение вертикального потока осадочного вещества: общее и по вкладам основных биогенных и литогенных компонентов на 1 м<sup>2</sup> дна (г/м<sup>2</sup>/год) и на всю площадь глубоководной части Белого моря (10<sup>6</sup> т в год) [Novigatsky et al., 2020]

Table 2. Average value of the vertical fluxes of sedimentary matter: total and by the contributions of the main biogenic and lithogenic components per 1 m<sup>2</sup> of the bottom (g/m<sup>2</sup>/year) and for the entire area of the deep-water part of the White Sea (10<sup>6</sup> tons per year) [Novigatsky et al., 2020]

Горизонт, м Horizon, m	Поток на 1 м <sup>2</sup> поверхности дна, г/м <sup>2</sup> /год Flux per 1 m <sup>2</sup> of the bottom, g/m <sup>2</sup> /year					Поток на глубоководную площадь моря (S = 50100 км <sup>2</sup> ), 10 <sup>6</sup> т в год Flux for the entire area of the deep-water part of the White Sea (S = 50100 km <sup>2</sup> ), 10 <sup>6</sup> tons per year				
	Поток валовый Total flux	ОВ Organic matter	SiO <sub>2ам</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Литогенная часть Lithogenic part	Поток валовый Total flux	ОВ Organic matter	SiO <sub>2ам</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Литогенная часть Lithogenic part
50–300	183	19	10	5	147	9	1	0.5	0.2	7.3

При среднем содержании компонентов в потоке (%): ОВ = 11; SiO<sub>2ам</sub> = 6; CaCO<sub>3</sub> = 3; литогенная часть = 80.  
With an average content of components in the flux (%): ОВ = 11; SiO<sub>2ам</sub> = 6; CaCO<sub>3</sub> = 3; lithogenic part = 80.

седиментологии, геохимии и биологии – непрерывные наблюдения во времени от суток до десятков лет.

Наблюдается ярко выраженная сезонная и даже месячная изменчивость потоков рассеянного осадочного вещества в Белом море – меняются в толще вод их количество, состав, свойства. Максимальные значения концентраций (мг/л) и потоков (мг/м<sup>2</sup>/сут) характерны для безледного весенне-летнего периода, минимальные свойственны зимнему периоду, когда море и питающий водосбор покрыты снежно-ледяным покровом, а речной и эоловый стоки незначительны. При смене гидрометеорологического режима возникают сезонные изменения потоков рассеянного осадочного вещества, повторяющиеся из года в год (повышенное содержание потоков в декабре, ледовая разгрузка в апреле, майская вспышка цветения фитопланктона и половодье).

Месячные, сезонные и годовые потоки рассеянного осадочного вещества во времени могут различаться между собой в несколько раз, особенно в весенний сезон, когда существенное влияние на величину потока оказывает ледовый режим акватории: ковровая снежно-ледовая разгрузка осадочного вещества – криозоля, речной сток, а также абразия, цветение фитопланктона. Потоки осадочного материала на дно напрямую зависят от взаимодействия вещества, поступающего из внешних геосфер.

Таким образом, на основе многолетних исследований небольшого моря Северного Ледовитого океана удалось установить новые закономерности осадочного процесса в условиях субарктической и арктической зон. Изучена месячная, сезонная, многолетняя динамика основных компонентов потоков рассеянного осадочного вещества. Представлена морская

стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени.

Показано, что биогенная составляющая потока при переходе из рассеянных форм в концентрированные понижается на порядок. Рассчитаны средние значения вертикального потока: общее и по вкладам основных биогенных и терригенных компонентов на 1 м<sup>2</sup> дна и на всю площадь глубоководной части Белого моря.

Удалось применить новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. Такой подход открывает возможность инситу (по потокам осадочного вещества в толще вод) изучать современную седиментацию в поверхностных слоях донных осадков и на новом технологическом уровне проследивать изменения природной среды и климата.

*Обработка материала из седиментационных ловушек выполнена при финансовой поддержке РФФ № 19-17-00234; обработка материала донных осадков выполнена при финансовой поддержке РФФ № 20-17-00157; обработка взвеси выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-05-00787; интерпретация полученных данных осуществлялась в рамках государственного задания ИО РАН на 2021 г. по теме № 0128-2021-0006.*

## Литература

Aliev R., Bobrov V., Kalmykov S., Melgunov M., Vlasova I., Shevchenko V., Novigatsky A., Lisitzin A. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2007. Vol. 274(2). P. 315–321. doi: 10.1007/s10967-007-1117-x

Berger V. Y., Primakov I. M. Assessment of primary production in the White Sea // *Russ. J. Mar. Biol.* 2007. Vol. 33, no. 1. P. 49–53. doi: 10.1134/S1063074007010051

Bringué M., Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort Sea, Canadian Arctic) // *Mar. Geol.* 2012. Vol. 291. P. 83–96. doi: 10.1016/j.margeo.2011.11.004

Demina L. L., Budko D. F., Novigatsky A. N., Alekseeva T. N., Kochenkova A. I. Occurrence forms of heavy metals in the bottom sediments of the White Sea // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea* / Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. *Environ. Part II, Hdb Env. Chem.* Springer, 2018. P. 241–270. doi: 10.1007/978-2018-328

Fahl K., Nöthig E. M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport // *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers.* 2007. Vol. 54, no. 8. P. 1256–1272. doi: 10.1016/j.dsr.2007.04.014

Gordeev V. V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // *Geomorphology.* 2006. Vol. 80, no. 1. P. 94–104. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.008

Honjo S., Doherty K. W. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application // *Deep-Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers.* 1988. Vol. 35, no. 1. P. 133–149. doi: 10.1016/0198-0149(88)90062-3

Ilyash L. V., Radchenko I. G., Shevchenko V. P., Lisitzin A. P., Paka V. T., Burenkov V. I., Novigatsky A. N., Chul'tsova A. L., Pantyulin A. N. Spatial distribution of phytoplankton in the White Sea in the late summer period with regard to the water structure and dynamics // *Oceanology.* 2011. Vol. 51, no. 6. P. 993–1003. doi: 10.1134/S000143701106004X

Ilyash L. V., Radchenko I. G., Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P. Vertical flux of phytoplankton and particulate matter in the White Sea according to the long-term exposure of sediment traps // *Oceanology.* 2013. Vol. 53, no. 2. P. 192–199. doi: 10.1134/S0001437013020057

Kravchishina M. D., Shevchenko V. P., Filippov A. S., Novigatsky A. N., Dara O. M., Alekseeva T. N., Bobrov V. A. Composition of the suspended particulate matter at the Severnaya Dvina River mouth (White Sea) during the spring flood period // *Oceanology.* 2010. Vol. 50, no. 3. P. 365–385. doi: 10.1134/S0001437010030070

Kravchishina M., Klyuvitkin A., Filippov A., Novigatsky A., Politova N., Shevchenko V., Lisitzin A. Suspended particulate matter in the White Sea: the results of long-term interdisciplinary research // *Proceed. Intern. Association Hydrol. Sci.* 2015. Vol. 365. P. 35–41. doi: 10.5194/piahs-365-35-2015

Kravchishina M. D., Lisitsyn A. P., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Politova N. V., Shevchenko V. P. Suspended particulate matter as a main source and proxy of the sedimentation processes // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea* / Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. *Environ. Part II, Hdb Env. Chem.* Springer, 2018. P. 13–48. doi: 10.1007/978-2018-353

Lalande C., Nöthig E. M., Somavilla R., Bauerfeind E., Shevchenko V., Okolodkov Y. Variability in un-

der-ice export fluxes of biogenic matter in the Arctic Ocean // *Global Biogeochem. Cycles.* 2014. Vol. 28, no. 5. P. 571–583. doi: 10.1002/2013GB004735

Lein A. Y., Kravchishina M. D., Politova N. V., Sawichev A. S., Veslopolova E. F., Mitskevich I. N., Ul'yanova N. V., Shevchenko V. P., Ivanov M. V. Transformation of particulate organic matter at the water-bottom boundary in the Russian Arctic seas: Evidence from isotope and radioisotope data // *Lithology and Mineral Resources.* 2012. Vol. 47, no. 2. P. 99–128. doi: 10.1134/S0024490212020034

Levitan M. A. Sedimentation rates in the Arctic Ocean during the last five marine isotope stages // *Oceanology.* 2015. Vol. 55, no. 3. P. 425–433. doi: 10.1134/S000143701503011X

Lisitzin A. P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: recent and past. Springer, 2002. 563 p.

Lisitzin A. P. Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a “living ocean” // *Russ. Geol. and Geophysics.* 2004. Vol. 45, no. 1. P. 15–48.

Lisitzin A. P. Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes // *Russ. Geol. and Geophysics.* 2010. Vol. 51, no. 1. P. 12–47. doi: 10.1016/j.rgg.2009.12.002

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Filippov A. S., Politova N. V. Dispersed organic matter and its fluxes in oceans and seas from the example of the White Sea: results of a 12-year study // *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 456, no. 1. P. 635–639. doi: 10.1134/S1028334X14050353

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Aliev R. A., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D. Comparative study of vertical suspension fluxes from the water column, rates of sedimentation, and absolute masses of the bottom sediments in the White Sea basin of the Arctic Ocean // *Dokl. Earth Sci.* 2015a. Vol. 465, no. 2. P. 1253–1256. doi: 10.1134/S1028334X1512003X

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A. Seasonal variation of fluxes of dispersed sedimentary matter in the White Sea (Arctic ocean basin) // *Dokl. Earth Sci.* 2015b. Vol. 465, no. 1. P. 1182–1186. doi: 10.1134/S1028334X15110112

Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Dynamics of the main components of fluxes of sedimentary matter in the White Sea // *Dokl. Earth Sci.* 2017. Vol. 472, no. 2. P. 252–255. doi: 10.1134/S1028334X17020295

Lukashin V. N., Kosobokova K. N., Shevchenko V. P., Shapiro G. I., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Pantyulin A. N., Pertzova N. M., Deev M. G., Solov'ev K. A., Prego R., Latche L. Results of multidisciplinary oceanographic studies in the White Sea in June 2000 // *Oceanology.* 2003. Vol. 43, no. 2. P. 224–239.

Lukashin V. N., Isaeva A. B., Rat'kova T. N., Prego R. Particulate matter and vertical particle fluxes in the White Sea // *Oceanology.* 2003. Vol. 43. P. 159–172.

Lukashin V. N., Klyuvitkin A. A., Lisitzin A. P., Novigatsky A. N. The MSL-110 small sediment trap // *Oceanology.* 2011. Vol. 51, no. 4. P. 699–703. doi: 10.1134/S0001437011040126

Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Druzhkova E. I. Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents

and White Seas // *Oceanology*. 2012. Vol. 52, no. 1. P. 112–121. doi: 10.1134/S0001437012010158

Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Klyuvitkin A. A., Shevchenko V. P., Kravchishina M. D., Politova N. V. Vertical fluxes of suspended sedimentary matter in Arctic sedimentogenesis of intracontinental seas // *Dokl. Earth Sci.* 2018a. Vol. 479, no. 1. P. 384–389. doi: 10.1134/S1028334X18030200

Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A., Lisitsyn A. P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea / Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem.* Springer, 2018b. P. 49–66. doi: 10.1007/698\_2018\_278

Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Sedimentogenesis in the White Sea: Vertical fluxes of suspended particulate matter and absolute masses of bottom sediments // *Oceanology*. 2020. Vol. 60, no. 3. P. 372–383. doi: 10.1134/S0001437020030078

Pertzova N. M., Kosobokova K. N. Zooplankton of the White Sea. History of investigations and the present state of knowledge – a review // *Berichte zur Polarforschung*. 2000. Vol. 359. P. 23–29.

Politova N. V., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Ul'yanova N. V., Chul'tsova A. L., Kravchishina M. D., Pavlova G. A., Lein A. Yu. Early diagenesis in recent bottom sediments of the Dvina Bay (White Sea) // *Oceanology*. 2016. Vol. 56, no. 5. P. 702–713. doi: 10.1134/S0001437016050106

Rachold V., Eicken H., Gordeev V. V., Grigoriev M. N., Hubberten H.-W., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Schirrmeyer L. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. R. Stein, R. W. Macdonald.* Berlin: Springer, 2004. P. 33–41. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8\_2

## References

Aliiev R., Bobrov V., Kalmykov S., Melgunov M., Vlasova I., Shevchenko V., Novigatsky A., Lisitzin A. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2007. Vol. 274(2). P. 315–321. doi: 10.1007/s10967-007-1117-x

Berger V. Y., Primakov I. M. Assessment of primary production in the White Sea. *Russ. J. Mar. Biol.* 2007. Vol. 33, no. 1. P. 49–53. doi: 10.1134/S1063074007010051

Bringué M., Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort Sea, Canadian Arctic). *Mar. Geol.* 2012. Vol. 291. P. 83–96. doi: 10.1016/j.margeo.2011.11.004

Demina L. L., Budko D. F., Novigatsky A. N., Alekseeva T. N., Kochenkova A. I. Occurrence forms of heavy metals in the bottom sediments of the White Sea. *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea.* Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018. P. 241–270. doi: 10.1007/698\_2018\_328

Fahl K., Nöthig E. M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic

Romankevich E. A., Vetrov A. A., Peresyppkin V. I. Organic matter of the World Ocean // *Russian Geology and Geophysics*. 2009. Vol. 50, no. 4. P. 299–307. doi: 10.1016/j.rgg.2009.03.013

Shevchenko V. R., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Alekseeva T. N., Filippov A. S., Nöthig E.-M., Novigatsky A. N., Pautova L. A., Platonov A. V., Politova N. V., Rat'kova T. N., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia) // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005. Vol. 9, no. 1–2. P. 57–66. doi: 10.5194/hess-9-57-2005

Shevchenko V. P., Pokrovsky O. S., Filippov A. S., Lisitsyn A. P., Bobrov V. A., Bogunov A. Yu., Zaverina N. N., Zolotykh E. O., Isaeva A. B., Kokryatskaya N. M., Korobov V. B., Kravchishina M. D., Novigatsky A. N., Politova N. V. On the elemental composition of suspended matter of the Severnaya Dvina River (White Sea Region) // *Dokl. Earth Sci.* 2010. Vol. 430, no. 2. P. 228–234. doi: 10.1134/S1028334X10020182

Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. Vol. 2. 592 p.

Vetrov A. A., Romankevich E. A. Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian arctic seas, 2003–2012 // *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 454, no. 1. P. 44–46. doi: 10.1134/S0001437011020196

Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M., Fukuchi M., Hargrave B., Moran B., Noji T., Nöthig E.-M., Olli K., Peinert R., Sasaki H., Shevchenko V. Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean.* Berlin: Springer, 2004. P. 101–138. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8\_5

Wefer G., Fischer G. Annual primary production and export flux in the Southern Ocean from sediment trap data // *Marine Chem.* 1991. Vol. 35, no. 1–4. P. 597–613. doi: 10.1016/S0304-4203(09)90045-7

Поступила в редакцию 10.02.2021

Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport. *Deep-Sea Res. Part I: Oceanographic Research Papers*. 2007. Vol. 54, no. 8. P. 1256–1272. doi: 10.1016/j.dsr.2007.04.014

Gordeev V. V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Geomorphology*. 2006. Vol. 80, no. 1. P. 94–104. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.09.008

Honjo S., Doherty K. W. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application. *Deep-Sea Res. Part A. Oceanographic Research Papers*. 1988. Vol. 35, no. 1. P. 133–149. doi: 10.1016/0198-0149(88)90062-3

Ilyash L. V., Radchenko I. G., Shevchenko V. P., Lisitzin A. P., Paka V. T., Burenkov V. I., Novigatsky A. N., Chul'tsova A. L., Pantyulin A. N. Spatial distribution of phytoplankton in the White Sea in the late summer period with regard to the water structure and dynamics. *Oceanology*. 2011. Vol. 51, no. 6. P. 993–1003. doi: 10.1134/S000143701106004X

Ilyash L. V., Radchenko I. G., Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P. Vertical flux of phytoplankton and particulate matter in the White Sea according

- to the long-term exposure of sediment traps. *Oceanology*. 2013. Vol. 53, no. 2. P. 192–199. doi: 10.1134/S0001437013020057
- Kravchishina M. D., Shevchenko V. P., Filippov A. S., Novigatsky A. N., Dara O. M., Alekseeva T. N., Bobrov V. A. Composition of the suspended particulate matter at the Severnaya Dvina River mouth (White Sea) during the spring flood period. *Oceanology*. 2010. Vol. 50, no. 3. P. 365–385. doi: 10.1134/S0001437010030070
- Kravchishina M., Klyuvitkin A., Filippov A., Novigatsky A., Politova N., Shevchenko V., Lisitzin A. Suspended particulate matter in the White Sea: the results of long-term interdisciplinary research. *Proceed. Intern. Association Hydrol. Sci.* 2015. Vol. 365. P. 35–41. doi: 10.5194/piahs-365-35-2015
- Kravchishina M. D., Lisitsyn A. P., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Politova N. V., Shevchenko V. P. Suspended particulate matter as a main source and proxy of the sedimentation processes. *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018. P. 13–48. doi: 10.1007/698\_2018\_353
- Lalande C., Nöthig E. M., Somavilla R., Bauerfeind E., Shevchenko V., Okolodkov Y. Variability in under-ice export fluxes of biogenic matter in the Arctic Ocean. *Global Biogeochem. Cycles*. 2014. Vol. 28, no. 5. P. 571–583. doi: 10.1002/2013GB004735
- Lein A. Y., Kravchishina M. D., Politova N. V., Savichev A. S., Veslopolova E. F., Mitskevich I. N., Ul'yanova N. V., Shevchenko V. P., Ivanov M. V. Transformation of particulate organic matter at the water-bottom boundary in the Russian Arctic seas: Evidence from isotope and radioisotope data. *Lithology and Mineral Resources*. 2012. Vol. 47, no. 2. P. 99–128. doi: 10.1134/S0024490212020034
- Levitan M. A. Sedimentation rates in the Arctic Ocean during the last five marine isotope stages. *Oceanology*. 2015. Vol. 55, no. 3. P. 425–433. doi: 10.1134/S000143701503011X
- Lisitzin A. P. Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: recent and past. Berlin: Springer, 2002. 563 p.
- Lisitzin A. P. Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a “living ocean”. *Russian Geology and Geophysics*. 2004. Vol. 45, no. 1. P. 15–48.
- Lisitzin A. P. Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes. *Russ. Geol. and Geophysics*. 2010. Vol. 51, no. 1. P. 12–47. doi: 10.1016/j.rgg.2009.12.002
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Filippov A. S., Politova N. V. Dispersed organic matter and its fluxes in oceans and seas from the example of the White Sea: results of a 12-year study. *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 456, no. 1. P. 635–639. doi: 10.1134/S1028334X14050353
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Aliev R. A., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D. Comparative study of vertical suspension fluxes from the water column, rates of sedimentation, and absolute masses of the bottom sediments in the White Sea basin of the Arctic Ocean. *Dokl. Earth Sci.* 2015a. Vol. 465, no. 2. P. 1253–1256. doi: 10.1134/S1028334X1512003X
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A. Seasonal variation of fluxes of dispersed sedimentary matter in the White Sea (Arctic ocean basin). *Dokl. Earth Sci.* 2015b. Vol. 465, no. 1. P. 1182–1186. doi: 10.1134/S1028334X15110112
- Lisitzin A. P., Novigatsky A. N., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Dynamics of the main components of fluxes of sedimentary matter in the White Sea. *Dokl. Earth Sci.* 2017. Vol. 472, no. 2. P. 252–255. doi: 10.1134/S1028334X17020295
- Lukashin V. N., Kosobokova K. N., Shevchenko V. P., Shapiro G. I., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Pantyulin A. N., Pertzova N. M., Deev M. G., Solov'ev K. A., Prego R., Latche L. Results of multidisciplinary oceanographic studies in the White Sea in June 2000. *Oceanology*. 2003. Vol. 43, no. 2. P. 224–239.
- Lukashin V. N., Isaeva A. B., Rat'kova T. N., Prego R. Particulate matter and vertical particle fluxes in the White Sea. *Oceanology*. 2003. Vol. 43. P. 159–172.
- Lukashin V. N., Klyuvitkin A. A., Lisitzin A. P., Novigatsky A. N. The MSL-110 small sediment trap. *Oceanology*. 2011. Vol. 51, no. 4. P. 699–703. doi: 10.1134/S0001437011040126
- Mityaev M. V., Gerasimova M. V., Druzhkova E. I. Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents and White Seas. *Oceanology*. 2012. Vol. 52, no. 1. P. 112–121. doi: 10.1134/S0001437012010158
- Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Klyuvitkin A. A., Shevchenko V. P., Kravchishina M. D., Politova N. V. Vertical fluxes of suspended sedimentary matter in Arctic sedimentogenesis of intracontinental seas. *Doklady Earth Sciences*. 2018a. Vol. 479, no. 1. P. 384–389. doi: 10.1134/S1028334X18030200
- Novigatsky A. N., Klyuvitkin A. A., Lisitsyn A. P. Vertical fluxes of dispersed sedimentary matter, absolute masses of the bottom sediments, and rates of modern sedimentation. *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Eds. A. P. Lisitzin, L. L. Demina. Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer, 2018b. P. 49–66. doi: 10.1007/698\_2018\_278
- Novigatsky A. N., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Klyuvitkin A. A., Kravchishina M. D., Politova N. V. Sedimentogenesis in the White Sea: Vertical fluxes of suspended particulate matter and absolute masses of bottom sediments. *Oceanology*. 2020. Vol. 60, no. 3. P. 372–383. doi: 10.1134/S0001437020030078
- Pertzova N. M., Kosobokova K. N. Zooplankton of the White Sea. History of investigations and the present state of knowledge – a review. *Berichte zur Polarforschung*. 2000. Vol. 359. P. 23–29.
- Politova N. V., Klyuvitkin A. A., Novigatsky A. N., Ul'yanova N. V., Chul'tsova A. L., Kravchishina M. D., Pavlova G. A., Lein A. Yu. Early diagenesis in recent bottom sediments of the Dvina Bay (White Sea). *Oceanology*. 2016. Vol. 56, no. 5. P. 702–713. doi: 10.1134/S0001437016050106
- Rachold V., Eicken H., Gordeev V. V., Grigoriev M. N., Hubberten H.-W., Lisitzin A. P., Shevchenko V. P., Schirrmeister L. Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Eds. R. Stein,

R. W. Macdonald. Berlin: Springer, 2004. P. 33–41. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8\_2

Romankevich E. A., Vetrov A. A., Peresyupkin V. I. Organic matter of the World Ocean. *Russ. Geol. and Geophysics*. 2009. Vol. 50, no. 4. P. 299–307. doi: 10.1016/j.rgg.2009.03.013

Shevchenko V. R., Dolotov Y. S., Filatov N. N., Alekseeva T. N., Filippov A. S., Nöthig E.-M., Novigatsky A. N., Pautova L. A., Platonov A. V., Politova N. V., Rat'kova T. N., Stein R. Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea (Russia). *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005. Vol. 9, no. 1–2. P. 57–66. doi: 10.5194/hess-9-57-2005

Shevchenko V. P., Pokrovsky O. S., Filippov A. S., Lisitsyn A. P., Bobrov V. A., Bogunov A. Yu., Zaverina N. N., Zolotykh E. O., Isaeva A. B., Kokryatskaya N. M., Korobov V. B., Kravchishina M. D., Novigatsky A. N., Politova N. V. On the elemental composition of suspended matter of the Severnaya Dvina River (White Sea Region). *Dokl. Earth Sci.* 2010. Vol. 430, no. 2. P. 228–234. doi: 10.1134/S1028334X10020182

Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. Vol. 2. 592 p.

Vetrov A. A., Romankevich E. A. Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian arctic seas, 2003–2012. *Dokl. Earth Sci.* 2014. Vol. 454, no. 1. P. 44–46. doi: 10.1134/S0001437011020196

Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M., Fukuchi M., Hargrave B., Moran B., Noji T., Nöthig E.-M., Olli K., Peinert R., Sasaki H., Shevchenko V. Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor. *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer, 2004. P. 101–138. doi: 10.1007/978-3-642-18912-8\_5

Wefer G., Fischer G. Annual primary production and export flux in the Southern Ocean from sediment trap data. *Marine Chem.* 1991. Vol. 35, no. 1–4. P. 597–613. doi: 10.1016/S0304-4203(09)90045-7

Received February 10, 2021

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### Новигатский Александр Николаевич

руководитель Аналитической лаборатории, к. г.-м. н.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: novigatsky@ocean.ru

### Шевченко Владимир Петрович

заместитель директора ИО РАН по геологическому  
направлению, к. г.-м. н.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: vshevch@ocean.ru

### Клювиткин Алексей Андреевич

ведущий научный сотрудник, к. г.-м. н.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: klyuvitkin@ocean.ru

### Кравчишина Марина Даниловна

ведущий научный сотрудник, к. г.-м. н.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: kravchishina@ocean.ru

### Политова Надежда Вячеславовна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.  
Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Нахимовский проспект, 36, Москва, Россия, 117997  
эл. почта: politova@ocean.ru

## CONTRIBUTORS:

### Novigatsky, Alexander

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: novigatsky@ocean.ru

### Shevchenko, Vladimir

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: vshevch@ocean.ru

### Klyuvitkin, Aleksey

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: klyuvitkin@ocean.ru

### Kravchishina, Marina

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: kravchishina@ocean.ru

### Politova, Nadezhda

Shirshov Institute of Oceanology,  
Russian Academy of Sciences  
36 Nakhimovskii Ave., 117997 Moscow, Russia  
e-mail: politova@ocean.ru