

УДК 551.465

## СЕДИМЕНТОГЕНЕЗ В БЕЛОМ МОРЕ: ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА И АБСОЛЮТНЫЕ МАССЫ ДОННЫХ ОСАДКОВ

© 2020 г. А. Н. Новигатский<sup>1</sup>, \*, А. П. Лисицын<sup>1</sup>, В. П. Шевченко<sup>1</sup>,  
А. А. Клювиткин<sup>1</sup>, М. Д. Кравчишина<sup>1</sup>, Н. В. Политова<sup>1</sup>

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

\*e-mail: novigatsky@ocean.ru

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

После доработки 09.12.2019 г.

Принята к публикации 16.12.2019 г.

Применен новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. 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.

**Ключевые слова:** Северный Ледовитый океан, Белое море, седиментационные ловушки, вертикальные потоки, осадочный материал, донные осадки, седиментация

**DOI:** 10.31857/S0030157420030077

### ВВЕДЕНИЕ

Рассеянная форма осадочного вещества очень широко распространена в природе, но мало изучена. Эта форма дисперсного осадочного вещества существует во всех геосферах – аэрозоли в атмосфере, гидрозолы – в морской и пресной воде, криозолы – во льдах и снеге. Она существует и в местах подводных извержений – гидротермальной деятельности (дымы “черных курильщиков”), в незначительных количествах поступает из космоса (космическая пыль). Важную роль в образовании золей играют также организмы, особенно 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) [23]. 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. Изучали в основном только их концентраты: донные осадки океанов, морей, озер. Водная взвесь – единственный источник формирования донных осадков, главный источник пищи глубоководных организмов. Общей особенностью осадочного материала всех геосфер являются незначительные содержания в среде и размеры. Как и бактерии (биогенная часть взвеси), осадочный материал 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 [3, 23].

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.) [21, 24]. Для седи-

ментологии наибольший интерес представляет метод седиментационных ловушек [14, 31, 42]. 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 сменой станций один раз в год.

Таким образом, удается 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) [5, 25].

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 [2, 6, 22].

Скорости седиментации донных осадков Мирового океана меняются в широких пределах от менее 1 до 1000 мм/год и более. На континентальных окраинах Северного Ледовитого океана (СЛО) встречаются значения порядка 10 мм/год (в депозитрах 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 [2, 36, 39].

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

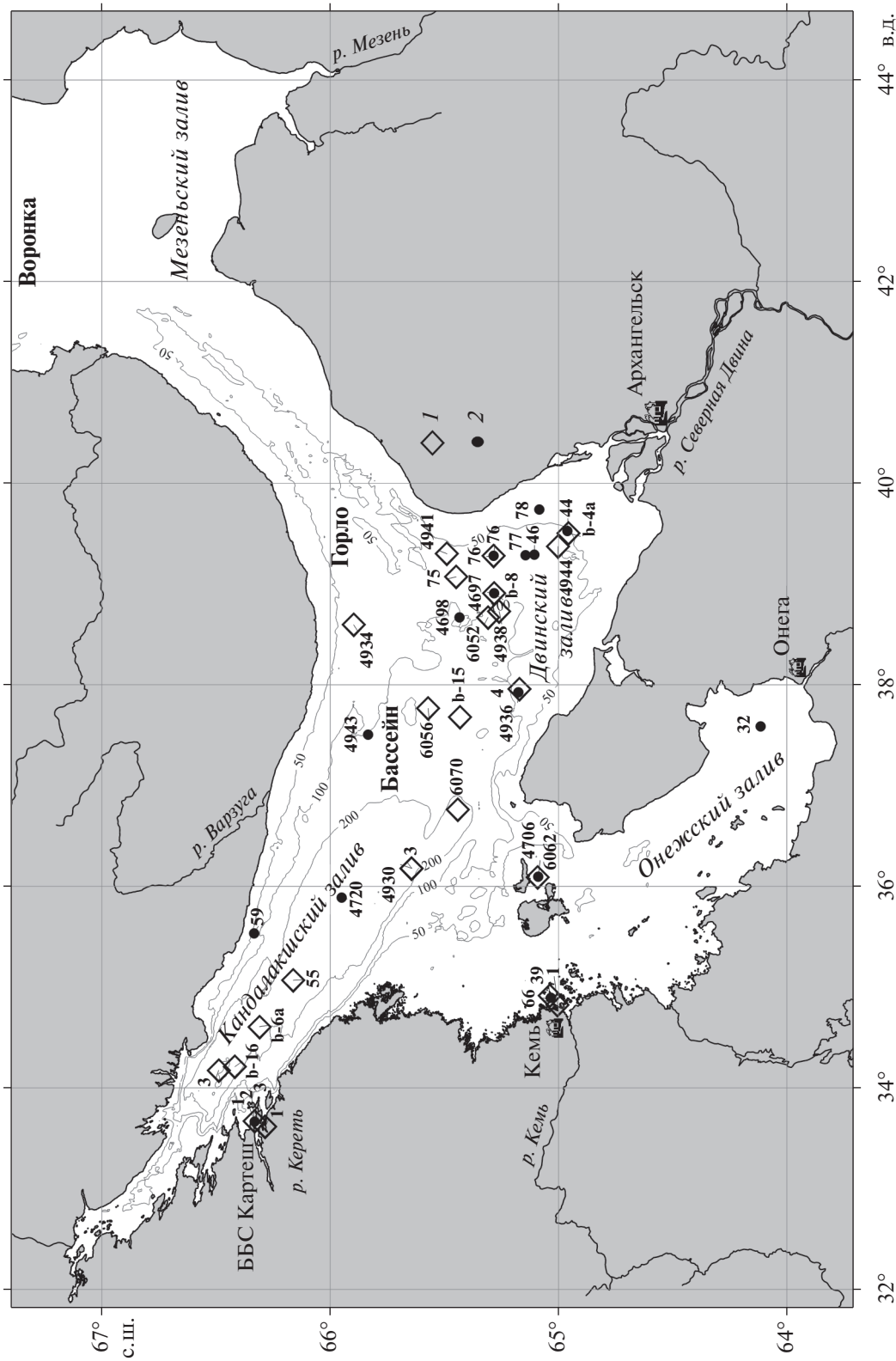
осадочной толщи – взаимодействие с осадочным веществом внутренних (глубинных) геосфер. К этим двум видам осадочного материала в морях и океанах добавляется еще рассеянное вещество, образующееся в море – биогенное ( $\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + \text{C}_{\text{орг}}$ ) [41]. В процессе смешения осадочного вещества всех этих геосфер (его растворенных и взвешенных форм) происходит не только образование, но и преобразование этих видов осадочного вещества, их неоднократное взаимодействие, смешение по мере осаждения, так что в донные осадки попадает осадочный материал, прошедший эти превращения на пути от поверхности до дна океана [24]. Все эти превращения удается 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 глубинных автоматических седиментационных обсерваторий (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 осаждения (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 изменений в ходе осаждения от поверхности до дна, причем непрерывно во времени (15 лет наблюдений) [25, 26].

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 выполнить 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 пара-



**Рис. 1.** Положение автоматических глубоководных седиментационных обсерваторий (АГОС) с седиментационными ловушками и измерителями течений с параллельным изучением взвеси и поверхностного слоя донных осадков — (1); оценка скорости седиментации по верхнему слою донных осадков (метод радиохронологии  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) — (2).

метров, 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 (MODIS-Aqua сканер) для всего времени работ спутников, т.е. круглогодичные [18, 19].

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 –  $C_{\text{орг}}$  ( $C_{\text{орг}} \cdot 2 = \text{ОВ}$ ) [7], для кремнистых панцирей –  $\text{SiO}_{2\text{ам}}$ , для карбонатных –  $\text{CaCO}_3$ , для литогенного материала – Al,  $\text{Si}_{\text{вал}}$  [29, 30]. Скорости современного осадконакопления в Белом море в верхнем слое осадков (0–20 см) определяли с помощью радионуклидного анализа ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ) [8].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В нашей 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) в концентрированную форму (донные осадки) с резким изменением реологии.

**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 [13, 17]. 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 [1, 16] и одновременно

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 [18] 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 [37, 38]. Своего максимума потоки осадочного вещества достигают в июне, превышая значение  $1000 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$  (ст. 3 – Кандакшский 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, ст. 76 – Двинский залив; ст. 55 – Кандакшский залив; рис. 2).

В конце летнего сезона, начале осени структура планктонного сообщества снова перестраивается, идет бурный рост мезопланктона, эврифагов и крупного зоопланктона [34]. 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  $1000 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$  (р. Кемь, биологическая станция Каргеш).

В конце осени солнечная активность снижается, планктонные сообщества мигрируют на большие глубины (зимовка) [34], 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); возможно, это связано со сменой гидрологического режима Белого моря и, как следствие, разрушением пикноклина. По данным Кравчишиной [18], 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 [27]. Зимние подледные вертикальные потоки осадочного вещества характеризуются самыми низкими значениями, которые не превышают  $70 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$  (ст. 4930 – Бассейн; рис. 2). Это связано с ослаблением солнечной радиации и полным ее прекращением в полярную ночь.

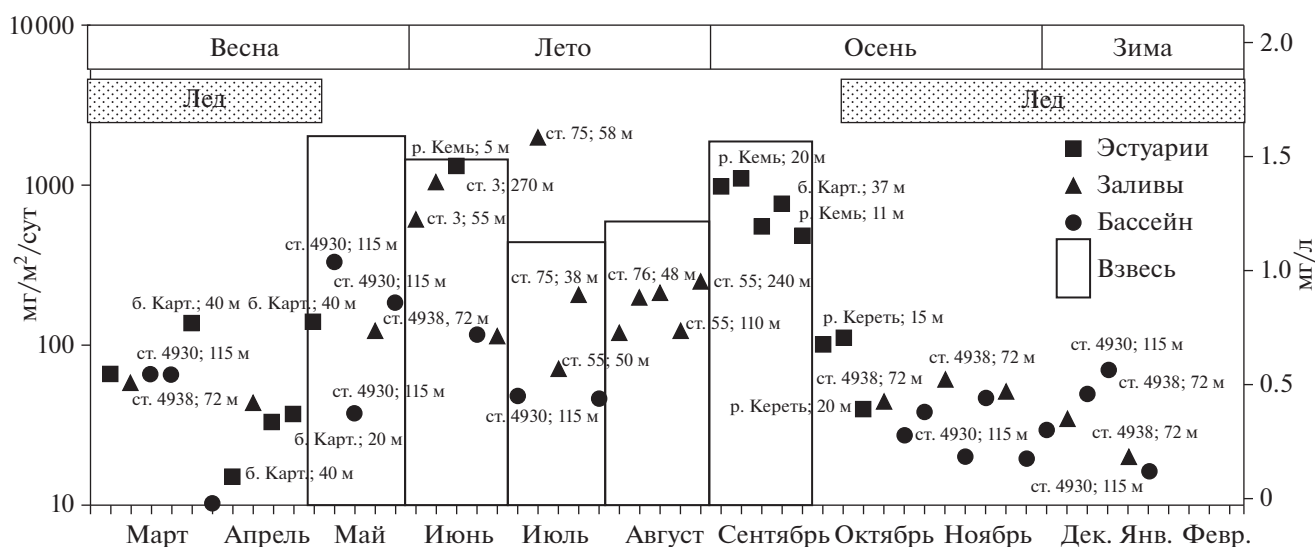


Рис. 2. Сезонная динамика месячных значений потоков осадочного вещества ( $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ ) и среднемесячных значений концентрации взвеси ( $\text{мг}/\text{л}$ ) в самой верхней части деятельного слоя по данным спутникового сканера MODIS-Aqua [18] в Белом море.

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 снежноледовым 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 паводок). 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 снежноледовая 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.

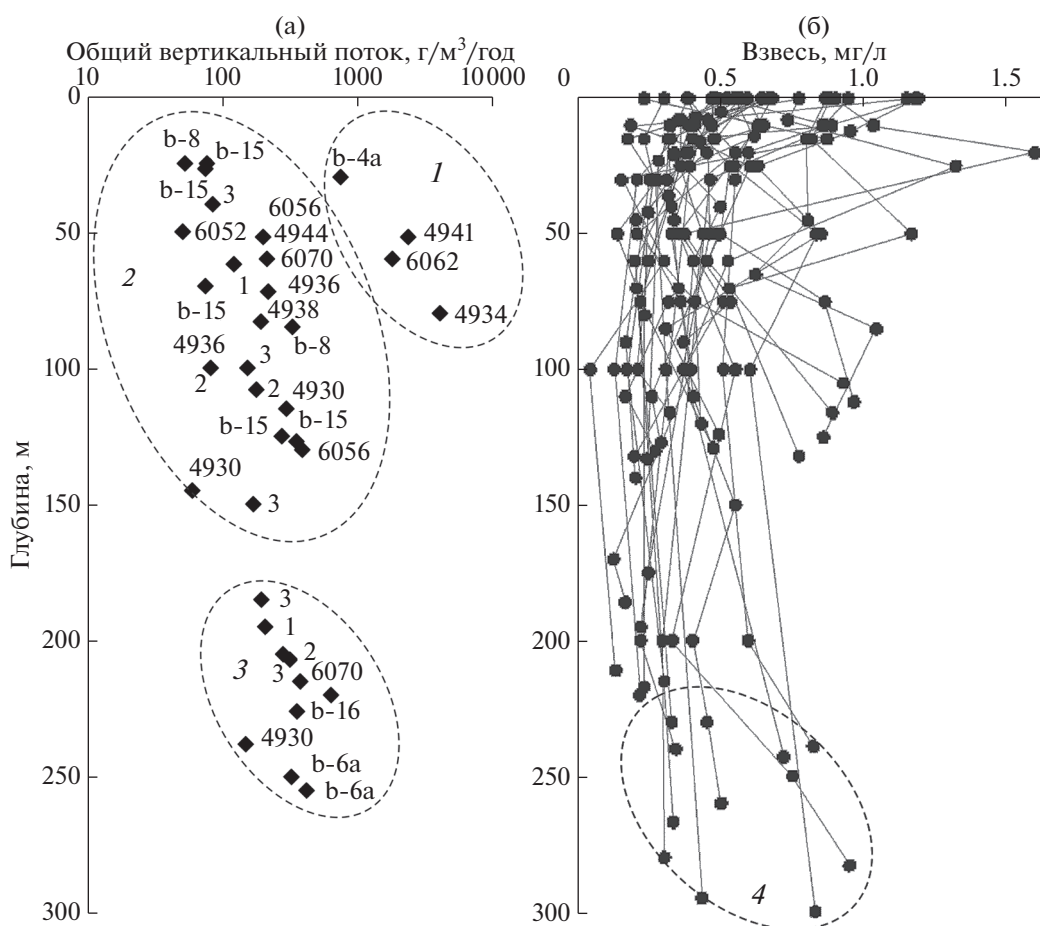
**Годовые интегральные потоки рассеянного осадочного вещества.** В ходе работ мы выделили два структурных фронта в Белом море: Северный, где через Горло поступают воды из Баренцева моря и уходят из Белого моря (Северодвинское течение), т.е. это область смешения вод, и Южный фронт близ Соловецких островов [25]. Эти фронтальные зоны характеризуются повышенными по сравне-

нию с другими частями моря концентрациями и потоками рассеянного вещества (взвеси). Здесь, кроме того, высокая интенсивность приливо-отливных течений. Именно здесь проявлены максимальные для моря среднегодовые значения потоков на трех станциях 6062, 4934, 4941: 4082–1814, в среднем  $2758 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$  (рис. 3а).

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 [12, 20].

Повышены потоки осадочного вещества в заливах Белого моря — Двинском и Кандалакшском, в особенности в областях их маргинальных фильтров (зоны смешения речных и морских вод) [25, 27]. Так, средняя многолетняя величина потока для Двинского залива  $243 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$ , а в Кандалакшском заливе  $367 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$  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  $100 \text{ м}$  над дном, а иногда и больше). Здесь основное значение имеют придонные тече-



**Рис. 3.** Соотношение величин (а) — интегральных вертикальных потоков ( $\text{г/м}^2/\text{год}$ ) и (б) — взвеси ( $\text{мг/л}$ ) 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.

ния, 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 приливо-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. 3б) [29, 30].

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 [25]. Интересной также оказалась связь величин потоков с глубиной (рис. 3а). Высокие значения отмечены над пикноклином и на пик-

ноклине (рис. 3а, область 1), они снижаются на шельфе (0–200 м) и вновь растут на склоне (рис. 3а, 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 моря 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  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  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  $\text{г/м}^2/\text{год}$  (табл. 1). Этому не противоречат данные о скоростях осадконакопления в прибрежных участках Кандалакшского залива Белого моря

**Таблица 1.** Придонные вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества и оценка скорости осадконакопления в верхнем слое осадка в Белом море

Придонные вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества					
станция	широта (с.ш.)	долгота (в.д.)	глубина, м	горизонт, м	величина придонного потока, г/м <sup>2</sup> /год
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					335
Минимум					149
Максимум					1814
Стандартное отклонение					372
Оценка скорости осадконакопления в верхнем слое осадка (метод радиохронологии <sup>210</sup> Pb and <sup>137</sup> Cs)					
станция	широта (с.ш.)	долгота (в.д.)	глубина, м	скорость осадконакопления, мм/год	абсолютные массы*, г/м <sup>2</sup> /год
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
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				1.0	310
Минимум				0.40	93
Максимум				4.2	1260
Стандартное отклонение				1.1	332

\* При средней плотности сухого осадка (0–20 см) 0.3 г/см<sup>3</sup>.



0.3–1.0 мм/год [4, 32], в море Бофорта 1.4 мм/год [10] и другие определения по Арктике [39].

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 деструкцией органического вещества и всей биогенной триады во время нахождения вещества в самом верхнем слое (наилке). Это подтверждается исследованиями по органическому веществу [35], 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> аморф).

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 [33].

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. Этот 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 составляет 1.5 см/с и не создает существенных препятствий для осаждения под действием силы тяжести [25]. Кроме того, на отдельных станциях выделяются участки быстрой и сверхбыстрой седиментации в устьевых (ст. b-4a) 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.

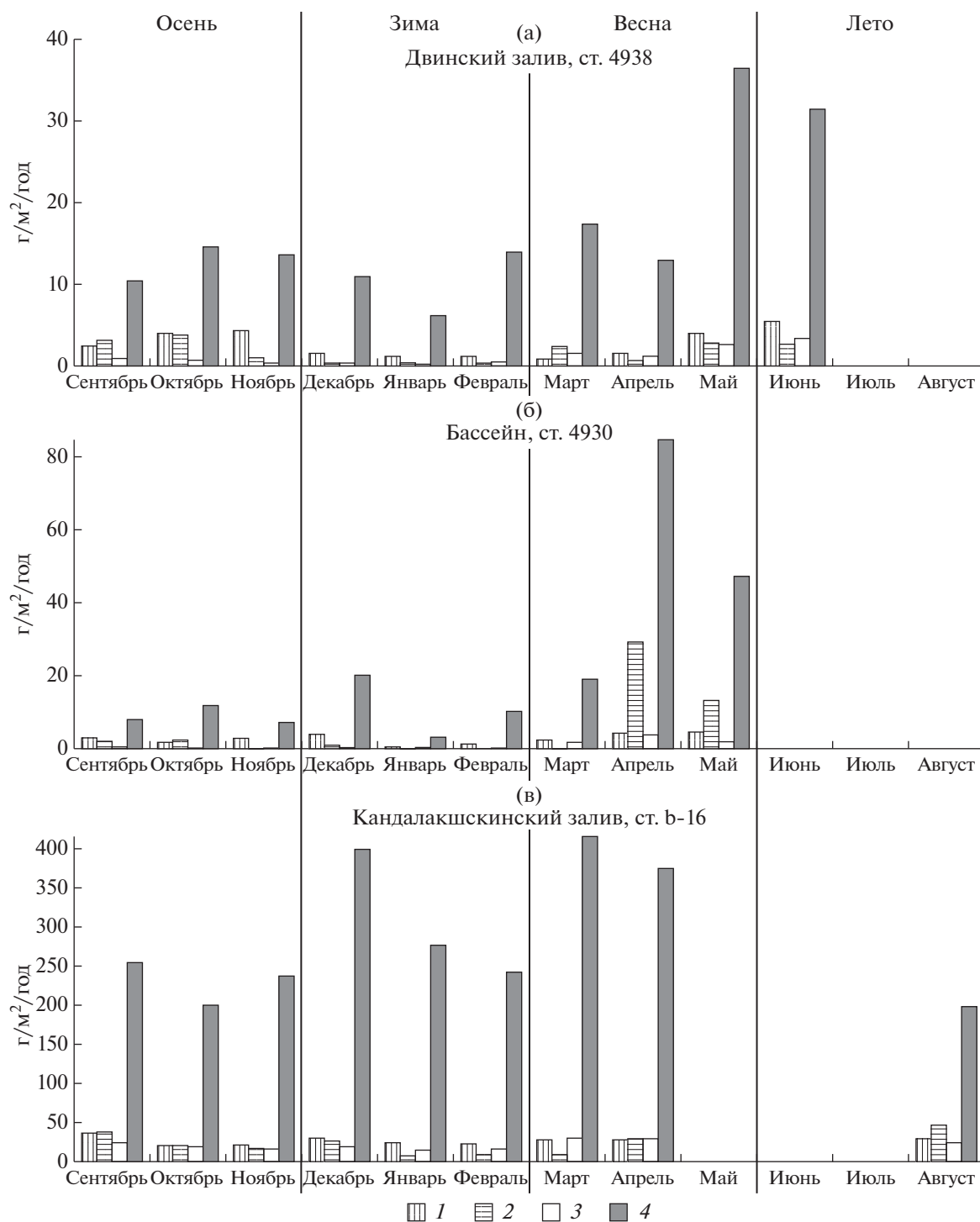
**Динамика основных компонентов потока осадочного вещества.** На рис. 4 представлен месячный и сезонный ходы основных компонентов рассеянного осадочного вещества в Белом море. Отчетливо выделяется высокая доля литогенной части на протяжении года. Это характерная особенность внутриконтинентальных морей. 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 ОВ составляют планктонные водоросли, вклад которых может составлять до 90% [16]. 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 [1, 15]. Своих максимальных значений биогенные компоненты потока достигают в безледный период (рис. 4), однако высокие значения ОВ встречаются и в зимние месяцы, что связано с поступлением обогащенных биогенными элементами баренцевоморских вод, а также зимней миграцией зоопланктона в придонные горизонты [34].

Обращают на себя внимание лавинные скорости седиментации в весенне-летний сезон (рис. 4а, 4б). Это явление типично для морей Арктики и обусловлено наложением нескольких процессов поступления осадочного вещества – таяние снежно-ледового покрова, бурное цветение планктона, мощный речной паводок [27].

На рис. 5 показана морская стадия седиментации основных компонентов рассеянного осадочного вещества во времени, где материал с месячной экспозицией (взвесь) получен 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 [28]. В осадочном материале с годовой экспозицией отчетливо фиксируется уменьшение доли биогенной

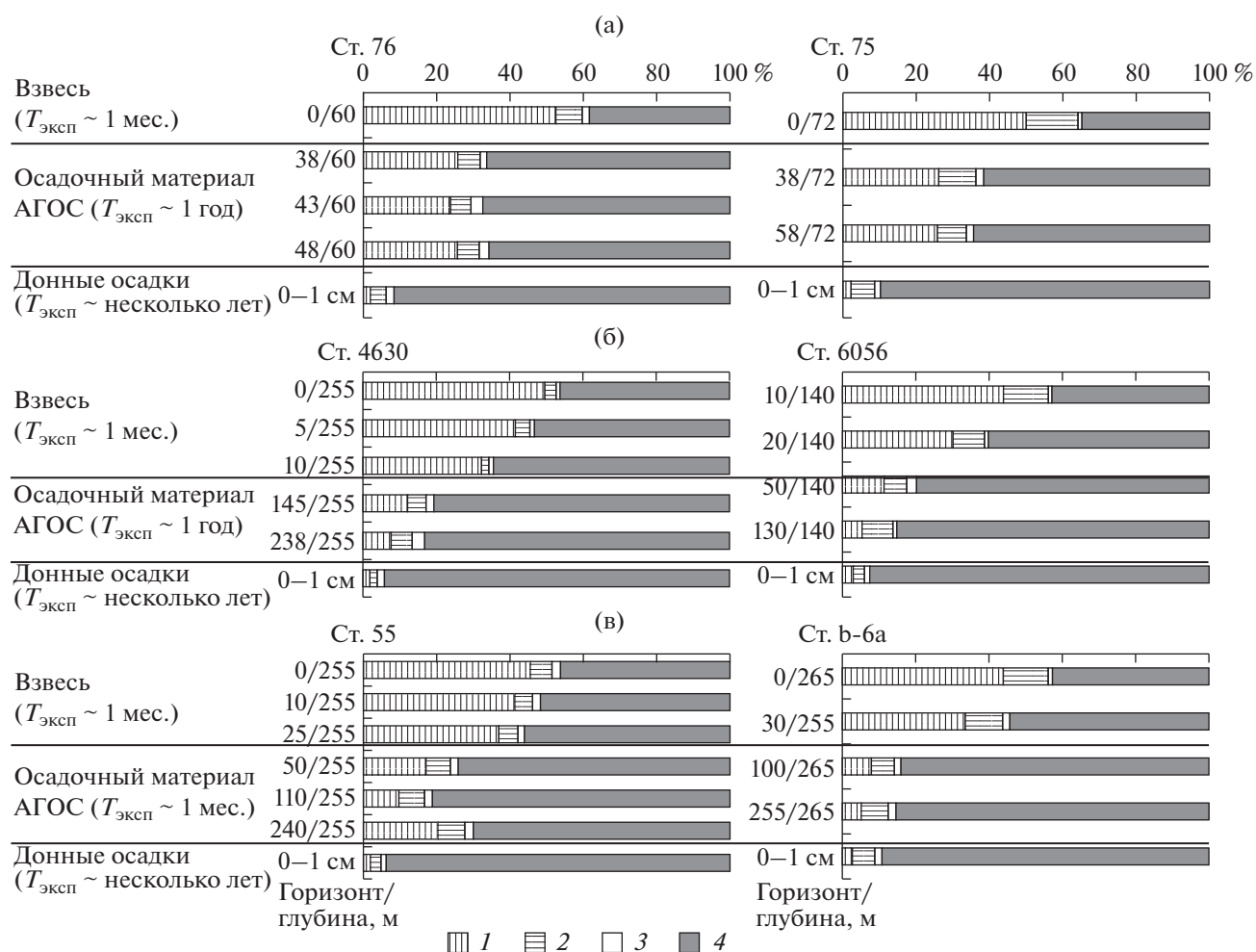




**Рис. 4.** Изменения главных компонентов вертикальных потоков ( $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ ) в толще вод Белого моря по месяцам и сезонам, полученные в разных частях акватории с помощью седиментационных ловушек в составе АГОС: (а) – Двинский зал. (ст. 4938, глубина 117 м, горизонт постановки 72 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 –  $\text{SiO}_2$ , 3 –  $\text{CaCO}_3$ , 4 – литогенная часть. Положение АГОС на рис. 1.

составляющей в несколько раз по отношению к месячной экспозиции, а в материале с многолетней экспозицией доля биогенной составляющей уменьшается уже на порядок, поскольку основ-

ным источником энергии биохимических процессов при переходе рассеянных форм в концентрированные выступает ОВ, поступающее из взвеси, и восстановленные соединения, поступающие из



**Рис. 5.** Морская стадия седиментации основных компонентов (%) рассеянного осадочного вещества во времени, полученные методом АГОС: (а) – Двинский зал.; (б) – Бассейн; (в) – Кандалакшский зал. 1 – органическое вещество (ОВ), 2 –  $\text{SiO}_2_{\text{ам}}$ , 3 –  $\text{CaCO}_3$ , 4 – литогенная часть.

осадков [11, 35]. 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 [21].

По данным многолетних исследований АГОС нам удалось рассчитать поступление и среднее со-

держание основных компонентов потока рассеянного осадочного вещества в Белом море (табл. 2). В литературе встречены попытки оценить потоки углерода по первичной продукции [9] и спутниковым данным [40], однако прямых определений на разных горизонтах водного столба по всей акватории до сегодняшнего дня не проводили.

**Таблица 2.** Среднее значение вертикального потока осадочного вещества: общее и по вкладам основных биогенных и терригенных компонентов на  $1 \text{ м}^2$  дна ( $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$ ) и на всю площадь глубоководной части Белого моря ( $10^6 \text{ т}$  в год)

Горизонт, м	Поток на $1 \text{ м}^2$ поверхности дна, $\text{г}/\text{м}^2/\text{год}$					Поток на глубоководную площадь моря ( $S = 50100 \text{ км}^2$ ), $10^6 \text{ т}$ в год				
	поток валовый	ОВ	$\text{SiO}_2_{\text{ам}}$	$\text{CaCO}_3$	литогенная часть	поток валовый	ОВ	$\text{SiO}_2_{\text{ам}}$	$\text{CaCO}_3$	литогенная часть
50–300	183	19	10	5	147	9	1	0.5	0.2	7.3

При среднем содержании компонентов в потоке (%): ОВ = 11;  $\text{SiO}_2_{\text{ам}}$  = 6;  $\text{CaCO}_3$  = 3; литогенная часть = 80.

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, 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 ледовым покровом, а речной и эоловой 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 фито планктона и паводок).

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 концен-

трированные 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.

**Источник финансирования.** Обработка материала выполнена при финансовой поддержке РФФ № 19-17-00234, определение органического углерода за счет средств РФФИ № 19-05-00022, а также в рамках государственного задания ИО РАН на 2019–2020 гг. по теме № 0149-2019-0007 осуществлялась интерпретация полученных данных.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ильяш Л.В., Житина Л.С., Федоров В.Д.* Фитопланктон Белого моря. М.: Янус-К, 2003. 168 с.
2. *Левитан М.А.* Скорости седиментации отложений последних пяти морских изотопных стадий в Северном Ледовитом океане // *Океанология*. 2015. Т. 55. №. 3. С. 470–470.
3. *Лисицын А.П.* Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли // *Глобальные изменения природной среды*. Новосибирск: СО РАН, 2001. С. 163–249.
4. *Митяев М.В., Герасимова М.В., Павлова Л.Г.* Взвесь и потоки осадочного вещества в губах Карельского побережья в 2016–2018 годах // *Труды Кольского научного центра РАН*. 2019. Т. 10. №. 3. С. 5–13.
5. *Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Кловиткин А.А. и др.* Вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества в Арктическом седиментогенезе внутрисконтинентальных морей // *Докл. РАН*. 2018. Т. 479. № 2. С. 206–211.
6. *Пантюлин А.Н.* Динамика, структура и водные массы // *Система Белого моря. Водная толща и взаимодействующие с ней атмосфера, криосфера, речной сток и биосфера* / Под ред. Лисицына А.П. М.: Научный мир, 2012. Т. 2. С. 309–379.
7. *Романкевич Е.А.* Биогеохимия органического вещества арктических морей. М.: Наука, 1982. 242 с.
8. *Aliiev R., Bobrov V., Kalmykov S. et al.* Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2007. V. 274 (2). P. 315–321.
9. *Berger V.Y., Primakov I.M.* Assessment of primary production in the White Sea // *Russian Journal of Marine Biology*. 2007. V. 33. № 1. P. 49–53.

10. *Bringué M., Rochon A.* Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort Sea, Canadian Arctic) // *Marine Geology*. 2012. V. 291. P. 83–96.
11. *Demina L.L., Budko D.F., Novigatsky A.N. et al.* Occurrence Forms of Heavy Metals in the Bottom Sediments of the White Sea // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea / Eds. Lisitzin A.P., Demina L.L. Environment Part II, Hdb Env Chem. Springer International Publishing AG, 2018. P. 241–270.*
12. *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. V. 54. № 8. P. 1256–1272.
13. *Gordeev V.V.* Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // *Geomorphology*. 2006. V. 80. № 1. P. 94–104.
14. *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. V. 35. № 1. P. 133–149.
15. *Ilyash L.V., Radchenko I.G., Shevchenko V.P. et al.* Spatial distribution of phytoplankton in the White Sea in the late summer period with regard to the water structure and dynamics // *Oceanology*. 2011. V. 51. № 6. P. 993–1003.
16. *Ilyash L.V., Radchenko I.G., Novigatsky A.N. et al.* Vertical flux of phytoplankton and particulate matter in the White Sea according to the long-term exposure of sediment traps // *Oceanology*. 2013. V. 53. № 2. P. 192–199.
17. *Kravchishina M.D., Shevchenko V.P., Filippov A.S. et al.* Composition of the suspended particulate matter at the Severnaya Dvina River mouth (White Sea) during the spring flood period // *Oceanology*. 2010. V. 50. № 3. P. 365–385.
18. *Kravchishina M., Klyuvitkin A., Filippov A. et al.* Suspended particulate matter in the White Sea: the results of long-term interdisciplinary research // *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*. 2015. V. 365. P. 35–41.
19. *Kravchishina M.D., Lisitsyn A.P., Klyuvitkin A.A. et al.* Suspended Particulate Matter as a Main Source and Proxy of the Sedimentation Processes // *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea / Eds. Lisitzin A.P., Demina L.L. Environment Part II, Hdb Env Chem. Springer International Publishing AG, 2018. P. 13–48.*
20. *Lalande C., Nöthig E. M., Somavilla R. et al.* Variability in under-ice export fluxes of biogenic matter in the Arctic Ocean // *Global Biogeochemical Cycles*. 2014. V. 28. № 5. P. 571–583.
21. *Lein A.Y., Kravchishina M.D., Politova N.V. et al.* 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. V. 47. № 2. P. 99–128.
22. *Lisitzin A.P.* Sea-ice and iceberg sedimentation in the ocean: recent and past. Berlin: Springer, 2002. 563 p.
23. *Lisitzin A.P.* Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a “living ocean” // *Russian Geology and Geophysics*. 2004. V. 45. № 1. P. 15–48.
24. *Lisitzin A.P.* Marine ice-rafting as a new type of sedimentogenesis in the Arctic and novel approaches to studying sedimentary processes // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V. 51. № 1. P. 12–47.
25. *Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P. et al.* Dispersed organic matter and its fluxes in oceans and seas from the example of the White Sea: results of a 12-year study // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 456. № 1. P. 635–639.
26. *Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Aliev R.A. et al.* 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 // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 465. № 2. P. 1253–1256.
27. *Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Klyuvitkin A.A.* Seasonal variation of fluxes of dispersed sedimentary matter in the White Sea (Arctic ocean basin) // *Doklady Earth Sciences*. 2015. V. 465. № 1. P. 1182–1186.
28. *Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P. et al.* Dynamics of the main components of fluxes of sedimentary matter in the White Sea // *Doklady Earth Sciences*. 2017. V. 472. № 2. P. 252–255.
29. *Lukashin V.N., Kosobokova K.N., Shevchenko V.P. et al.* Results of multidisciplinary oceanographic studies in the White Sea in June 2000 // *Oceanology*. 2003. V. 43. № 2. P. 224–239.
30. *Lukashin V.N., Isaeva A.B., Rat'kova T.N., Prego R.* Particulate matter and vertical particle fluxes in the White Sea // *Oceanology*. 2003. V. 43. P. 159–172.
31. *Lukashin V.N., Klyuvitkin A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N.* The MSL-110 small sediment trap // *Oceanology*. 2011. V. 51. № 4. P. 699–703.
32. *Mityaev M.V., Gerasimova M.V., Druzhkova E.I.* Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents and White Seas // *Oceanology*. 2012. V. 52. № 1. P. 112–121.
33. *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. Lisitzin A.P., Demina L.L. Environment Part II, Hdb Env Chem. Springer International Publishing AG, 2018. P. 49–66.*
34. *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. V. 359. P. 23–29.
35. *Politova N.V., Klyuvitkin A.A., Novigatsky A.N. et al.* Early diagenesis in recent bottom sediments of the Dvina Bay (White Sea) // *Oceanology*. 2016. V. 56. № 5. P. 702–713.
36. *Rachold V., Eicken H., Gordeev V.V. et al.* Modern terrigenous organic carbon input to the Arctic Ocean // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. Stein R., Macdonald R.W. Berlin: Springer. 2004. P. 33–41.*
37. *Shevchenko, V.R., Dolotov, Y.S., Filatov, N.N. et al.* Biogeochemistry of the Kem' River estuary, White Sea

- (Russia) // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005. V. 9. № 1–2. P. 57–66.
38. *Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Filippov A.S. et al.* On the elemental composition of suspended matter of the Severnaya Dvina River (White Sea Region) // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. № 2. P. 228–234.
39. *Stein R.* Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. V. 2. 592 p.
40. *Vetrov A.A., Romankevich E.A.* Primary production and fluxes of organic carbon to the seabed in the Eurasian arctic seas, 2003–2012 // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 454. № 1. P. 44–46.
41. *Wassmann P., Bauerfeind E., Fortier M. et al.* Particulate organic carbon flux to the Arctic Ocean sea floor // *The organic carbon cycle in the Arctic Ocean*. Berlin: Springer, 2004. P. 101–138.
42. *Wefer G., Fischer G.* Annual primary production and export flux in the Southern Ocean from sediment trap data // *Marine Chemistry*. 1991. V. 35. № 1–4. P. 597–613.

## Sedimentogenesis in the White Sea: Vertical Fluxes of Suspendet Particulate Matter and Absolute Masses of Bottom Sediments

A. N. Novigatsky<sup>a, #</sup>, **A. P. Lisitzin<sup>a</sup>**, V. P. Shevchenko<sup>a</sup>, A. A. Klyuvitkin<sup>a</sup>,  
M. D. Kravchishina<sup>a</sup>, N. V. Politova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Oceanology Shirshova RAS, Moscow, Russia*

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

A new approach has been applied in the study of marine sedimentation using dispersed sedimentary material in the sedimentation traps in comparison with the surface layer of bottom sediments. Based on long-term studies of the small sea of the Arctic Ocean, it was possible to establish new patterns of sedimentary process in the conditions of the Subarctic and Arctic zones. The monthly, seasonal, and long-term dynamics of the main components of the streams of dispersed sedimentary matter are studied. The marine stage of sedimentation of the main components of dispersed sedimentary matter in time is presented; it is shown that the biogenic component of the flux decreases by an order of magnitude when passing from dispersed forms to concentrated ones. The average values of the vertical fluxes are 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 area of the deep sea of the White Sea.

**Keywords:** Arctic Ocean, White Sea, sedimentation traps, vertical flux, sedimentary material, bottom sediments, sedimentation