

СОВРЕМЕННЫЕ ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В БЕЛОМ МОРЕ И ЭСТУАРИЯХ КРУПНЫХ РЕК ЕГО БАССЕЙНА

УДК 551.463.8

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА И СОВРЕМЕННЫЕ СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В БЕЛОМ МОРЕ

© 2022 г. А. Н. Новигатский^а, *, А. А. Клювиткин^а, М. Д. Кравчишина^а, Н. В. Политова^а,
А. С. Филиппов^а, В. П. Шевченко^а

^аИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: novigatsky@ocean.ru

Поступила в редакцию 04.02.2022 г.

После доработки 20.06.2022 г.

Принята к публикации 18.08.2022 г.

Изучено морское осадконакопление с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных ловушках в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. На основе обобщения многолетних исследований небольшого внутриконтинентального моря Северного Ледовитого океана, удалось установить новые закономерности осадочного процесса в условиях Субарктической и Арктической зон. Количественный переход рассеянных форм осадочного вещества в концентрированные формы (донные осадки) в Белом море подчиняется линейной зависимости, с локальным максимумом в глубинном нефелоидном слое. Выделяются области сверхбыстрой седиментации — маргинальные фильтры (р. Северная Двина и др.). Прямые количественные данные по потокам осадочного вещества в водной толще Белого моря, полученные с помощью метода седиментационных ловушек на обсерваториях АГОС за 15 лет исследований, дали следующие значения: под деятельным слоем в интервале 48–214 при среднем $74 \text{ г/м}^2/\text{год}$; в промежуточном слое 54–298 при среднем $132 \text{ г/м}^2/\text{год}$; в придонном горизонте 149–1814 при среднем $335 \text{ г/м}^2/\text{год}$. Скорости седиментации (по ^{210}Pb , ^{137}Cs) в поверхностном слое донных осадков в пересчете на абсолютные массы сухого осадка отвечают интервалу 93–1260 при среднем $310 \text{ г/м}^2/\text{год}$. Многолетние данные по концентрации рассеянного осадочного вещества в водной толще (взвеси) и величинам потока рассеянного осадочного вещества отчетливо фиксируют устойчивые круглогодичные нефелоидные слои. Таким образом, распределение рассеянных форм осадочного вещества в толще вод происходит по новым закономерностям, которые удастся выявить более отчетливо.

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

DOI: 10.31857/S2587556622060103

ВВЕДЕНИЕ

Последнее время в Арктике начали проводиться детальные сопоставления рассеянной формы осадочного вещества (взвеси) в водной толще с его связанной формой — поверхностным слоем донных осадков, т.е. с концентрированной формой осадочного вещества (Леин и др., 2012; Forest et al., 2015; Nonjo et al., 2010; Lein and Lisitsyn, 2018; Stein, 2008). Морское рассеянное осадочное вещество — биокосное, и состоит из живых планктонных организмов, их отмерших остатков, а также частиц минеральной природы (литогенных), местами вулканогенных и аутигенных. Осаждаясь в море, оно проходит несколько водных слоев, отличающихся по процессам, составу и свойствам, а достигнув дна — переходит из рассеянной в концентрированную форму (донные осадки). Таким образом, фиксируется различная по свойствам вертикальная стратификация среды — не только

ведущих процессов, но и осаждающегося рассеянного вещества в водной толще (Лисицын, 2004, 2010; Nonjo et al., 2008).

Количественная сторона современных осадочных процессов характеризуется концентрацией взвеси в воде (мг/л) и динамической единицей — потоком вещества на дно ($\text{г/м}^2/\text{год}$), которая определяется в донных осадках методом абсолютных масс (mass accumulation rate (MAR)) (Левитан, 2021; Pathirana et al., 2013; St. John, 2008). Скорость осадконакопления для современных донных отложений возрастом менее ста лет, как правило, определяется инструментальным ^{210}Pb -датированием, подтвержденным ^{137}Cs (Степанец и др., 2010; Aliev et al., 2007; Kuzyk et al., 2013).

При изучении осадочного процесса в Белом море нами были совмещены результаты экспедиционных исследований на кратковременных (суточных) станциях с годовыми постановками седи-

ментационных ловушек и одновременным исследованием поверхностного слоя донных осадков. Подобные работы выполнялись польскими коллегами в отдельной бухте Балтийского моря (Szymt-kiewicz and Zalewska, 2014), однако пространственное распределения взвеси в этом исследовании затронуто не было.

При таком подходе, удалось получить морской осадочный материал (природный самописец изменений среды и климата) в интервале возраста от суток, месяца и первых лет (материал седиментационных ловушек), до десятков лет — поверхностный слой позднеголоценовых (субатлантических) донных осадков (Лисицын и др., 2014, 2015а). Это дало возможность детально изучить осадочный процесс в самом широком диапазоне не только пространства, но и во времени.

Таким образом, целью настоящей работы стало прямое сопоставление рассеянной формы осадочного вещества, находящегося в водной толще, с кон-

центрированной его формой — донными осадками. Это дает потенциал для стационарного непрерывного круглогодичного исследования морской среды во всей толще вод от поверхности до дна.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В рамках программы ИО РАН “Система Белого моря” 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 ультраfiltrации взвеси, а также с помощью глубинных автоматических седиментационных обсерваторий (АГОС) с прямым количественным определением вертикальных потоков и непрерывным отбором вещества с разных глубин круглый год (Лисицын и др., 2015а, б). Это позволило получить прямые данные о количественной концентрации (мг/л), скорости осаждения (мм/год) и верти-

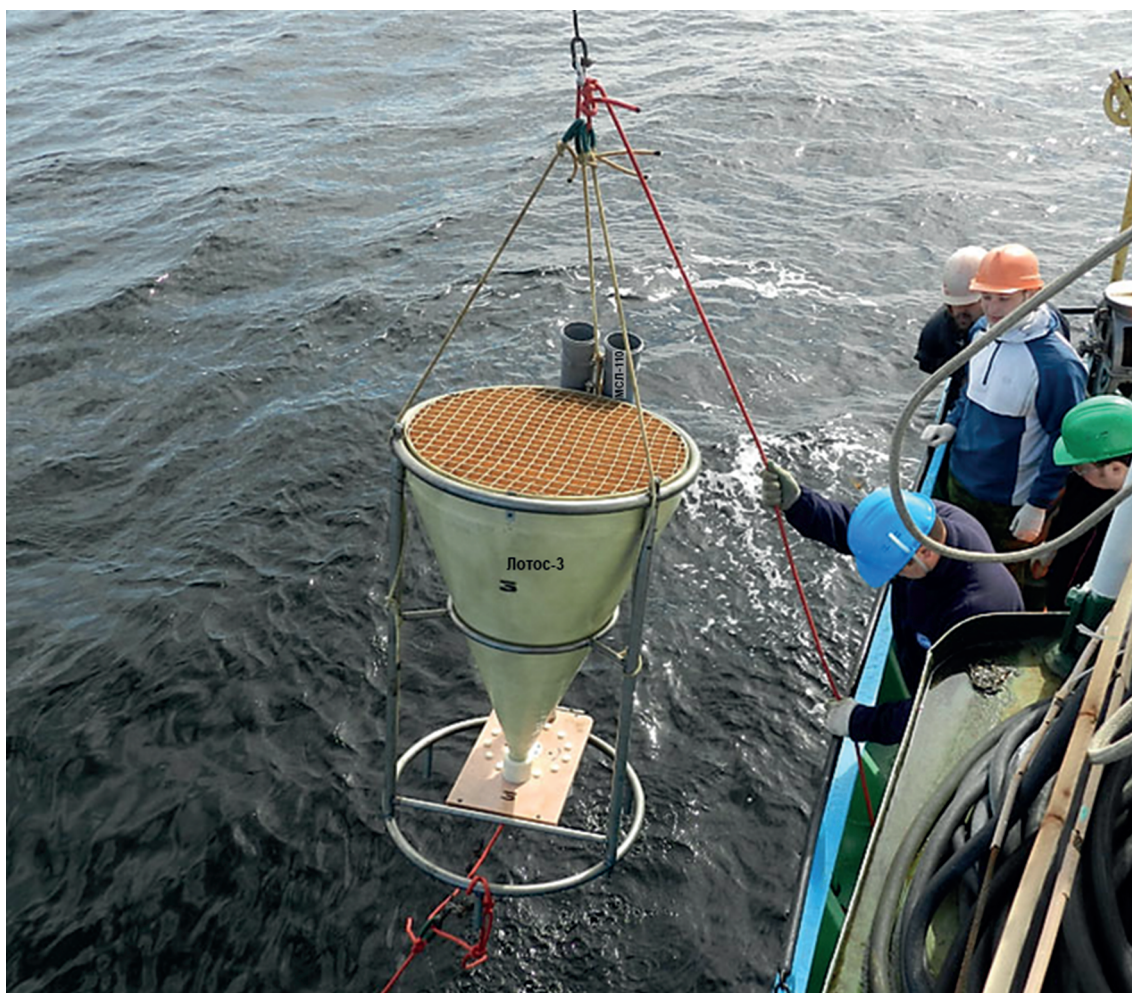


Рис. 1. Постановка большой конической 12-стаканной седиментационной ловушки Лотос-3 и малой седиментационной ловушки МСЛ-110 в составе автоматической глубоководной седиментационной обсерватории с борта НИС “Эколог” (фото июль 2012 г.).

кальных потоках ($\text{мг/м}^2/\text{сут}$), 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 (Новигатский и др., 2020; Novigatsky et al., 2018).

Количественное изучение осадочного вещества в толще вод (концентрация взвеси, мг/л) основано на методе мембранной ультрафильтрации, т.е. выделении частиц крупнее 0.45 мкм на фильтр с последующим качественным и количественным анализом (Kravchishina et al., 2015). 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 стандартным горизонтам), а в наиболее важных взвесеаккумулирующих местах (Kravchishina et al., 2018). Для самого верхнего слоя используют также спутниковые данные, подтвержденные подспутниковым отбором проб *in situ* в экспедиции в ясную погоду и безледное

время года (Лисицын и др., 2013). По данным двух спектральных каналов сканера цвета океана MODIS-Aqua 531 и 551 нм рассчитывался показатель рассеяния назад взвешенными частицами (bbp , м^{-1}) поверхностных вод (0–5 м) (Копелевич и др., 2015, 2018; Bisson et al., 2021).

Для изучения вертикальных потоков вещества в ИО РАН используются седиментационные ловушки двух типов: малые цилиндрические МСЛ-110 и большие конические 12-стаканные Лотос-3 (рис. 1), установленные в составе АГОС (Лукашин и др., 2011; Honjo and Doherty et al., 1988; Novigatsky et al., 2018). Этот метод позволяет измерять абсолютные массы осадочного материала на разных глубинах моря на основе прямых определений количества этого материала, осаждающегося в седиментационные ловушки (Лисицын и др., 2015а; Новигатский и др., 2020).

Поверхностный слой донных осадков отбирали трубкой Неймисто, скорости современного осадконакопления в верхнем слое осадков (0–20 см прецизионно делили через 1 см) определяли с по-

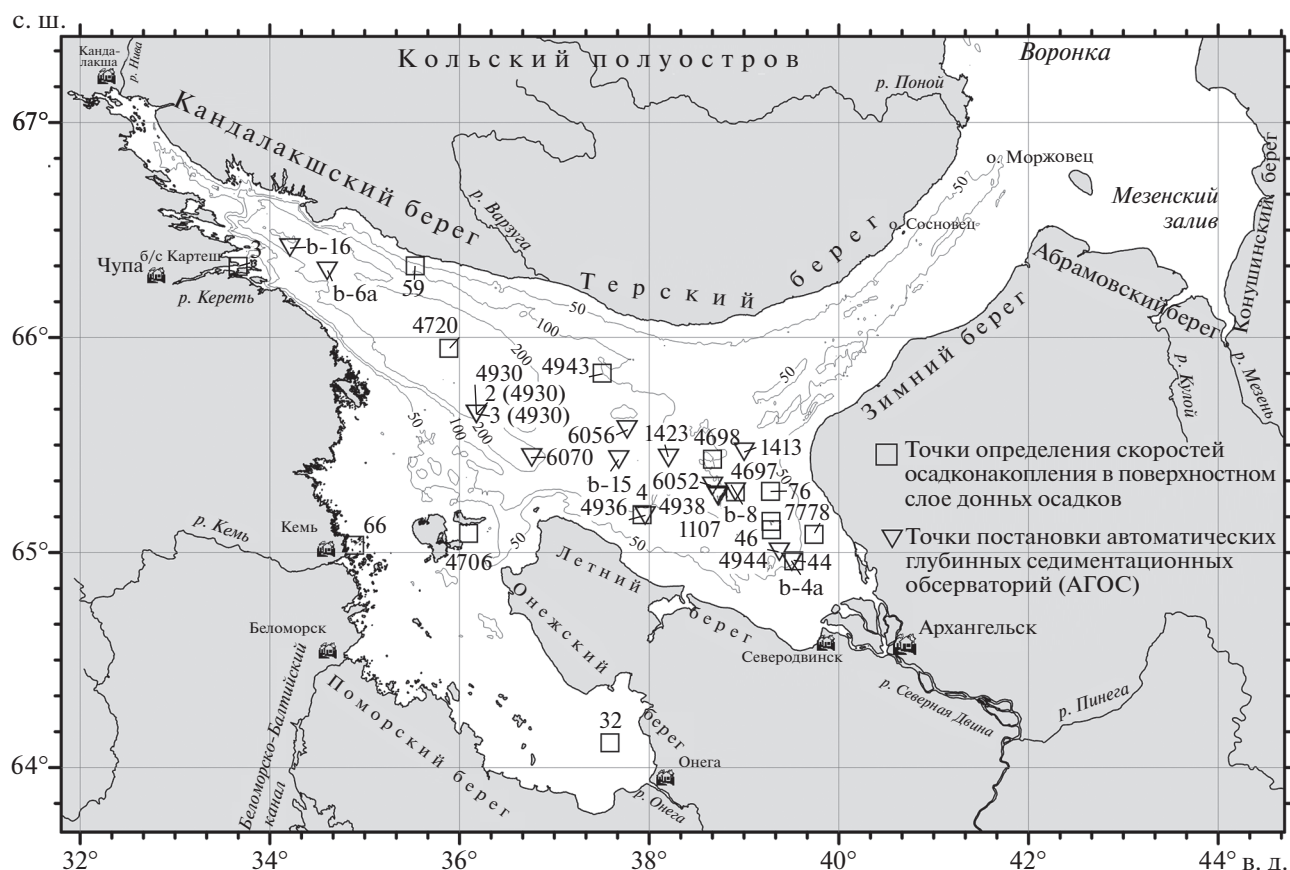


Рис. 2. Расположение обсерваторий АГОС годовой экспозиции и точки определения потоков (абсолютных масс) в поверхностном слое донных осадков (скорости седиментации по ^{210}Pb и ^{137}Cs пересчитаны в абсолютные массы (Лисицын и др., 2015а)) в Белом море.

мощью радионуклидного анализа ^{210}Pb и ^{137}Cs (Лисицын и др., 2015а; Aliev et al., 2007).

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. 2) (Лисицын и др., 2014; Лисицын и др., 2015а, б, 2017; Новигатский и др., 2018, 2020; Novigatsky et al., 2018).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Одна из особенностей шельфовых морей Арктики — нефелоидные слои, которые достигают здесь максимальных масштабов в пространстве и во времени. Они часто наблюдаются круглый год, а в зимний период при формировании морских льдов усиливаются за счет явления каскадинга (Лисицын, 2010). Наши многолетние данные по концентрации взвеси (рис. 3а) и величинам потока рассеянного осадочного вещества (рис. 3б) отчетливо фиксируют устойчивые круглогодичные нефелоидные слои в Белом море (Kravchishina et al., 2018; Novigatsky et al., 2018). Помимо этого, на схеме (см. рис. 3б) выделяется область сверхбыстрой седиментации маргинального фильтра р. Северная Двина (Novigatsky et al., 2018), которая четко проявляется как в водной толще (ст. б-4а, 1413), так и в поверхностном слое донных осадков (ст. 44, 78) (Новигатский и др., 2018).

Существенные изменения рассеянного осадочного вещества идут в основании деятельного слоя (над слоем скачка плотности) в ходе рециклинга — растворения биогенной части взвеси. Деструкция биогенного вещества усиливается скоплением в этом слое организмов-гетеротрофов и бактерий. Остаточный экспорт (нетто-продукция) первичной продукции, уходящей из деятельного слоя на глубины (пеллетный транспорт, сезонная трансформация пикноклина) оценивается в Белом море примерно $25 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (Бергер, Примаков, 2007; Ветров, Романкевич, 2014; Леин и др., 2012). Наши многолетние определения общего вертикального потока, полученные с помощью седиментационных ловушек, установленных ниже слоя скачка (на выходе из деятельного слоя), в среднем составляют $74 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (табл. 1; рис. 3б), т.е. почти в три раза больше, чем в указанных выше работах, что неоднократно было описано в предшествующих публикациях (Новигатский и др., 2018, 2020; Novigatsky et al., 2018).

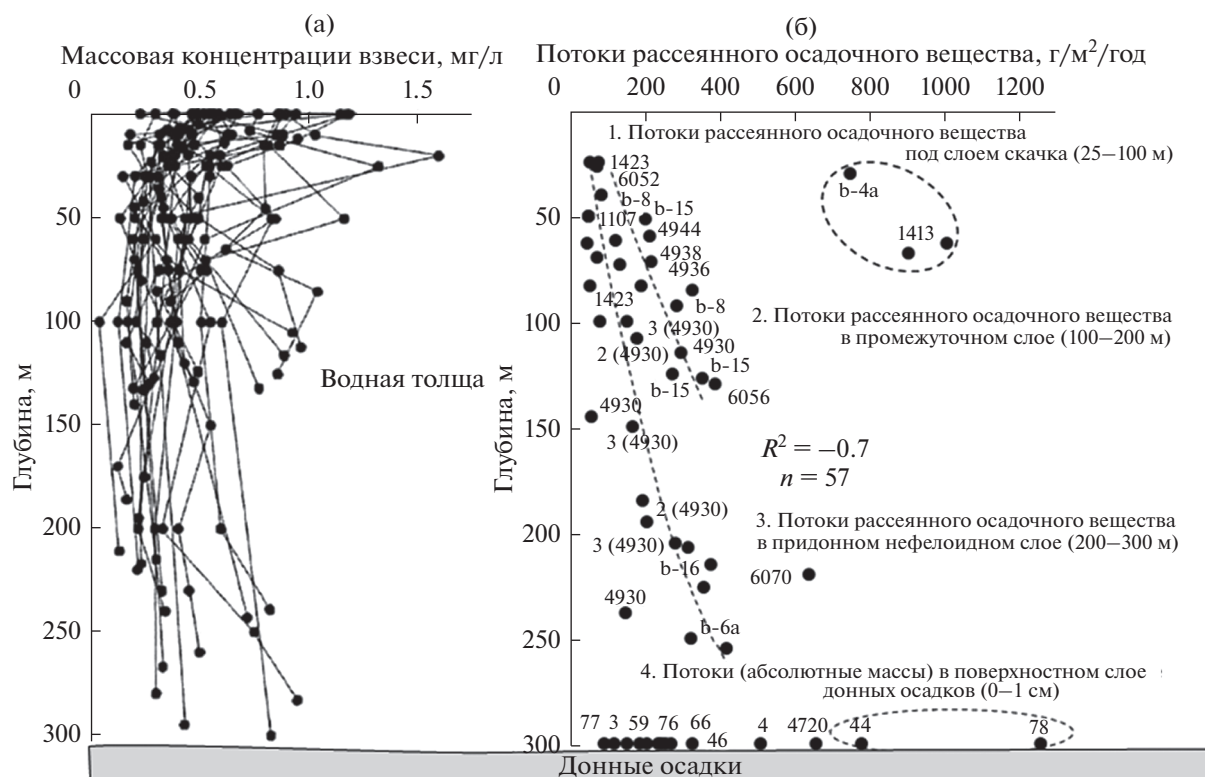


Рис. 3. Данные на основе многолетних исследований в Белом море: (а) вертикальное распределение массовой концентрации взвеси (Kravchishina et al., 2015, 2018); (б) линейная зависимость вертикальных потоков осадочного вещества от глубины (данные АГОС), пунктирными линиями выделена область лавинной седиментации (конус выноса) р. Северная Двина (Новигатский и др., 2018).

Ниже деятельного слоя в вертикальных потоках вещества пеллетный материал приобретает все большее значение. Часть его (особенно мелкие пеллеты) разрушается в толще вод, создавая “облака” тонкодисперсных частиц. С ростом глубины моря и полнотой растворения биогенной части взвесь в потоке становится все более терригенной. Наиболее устойчивые органические соединения поступают как с суши, так и из деятельного слоя (автохтонное планктонное органическое вещество) (Ильяш и др., 2013). Генезис этих двух главных видов органического углерода определяют по изотопному составу (Леин и др., 2012). Эти процессы тесно взаимодействуют с деятельностью организмов-фильтраторов зоопланктона, концентраторами осадочного вещества в пеллеты (Pertsova and Kosobokova, 2003). В промежуточном слое многолетние определения общего вертикального потока нами в среднем оцениваются в $132 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (см. табл. 1, рис. 3б). Двукратное увеличение потока мы связываем с влиянием придонного нефелоидного слоя.

У дна происходит новое постепенное сгущение рассеянного осадочного вещества: возникает глубинный нефелоидный слой с повышенным содержанием взвеси из-за придонных течений и взмучивания донных осадков, ресуспензии и неосаждения самых тонких частей осадочного вещества под влиянием течений. В этом слое, по нашим многолетним наблюдениям, общий вертикальный поток возрастает до $354 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (см. табл. 1, рис. 3б).

Донные осадки поверхностного слоя — это наиболее обводненная (влажность $>90\%$) и полужидкая их часть. Она особенно легко взмучивается течениями, так как силы сцепления между частицами еще очень слабы. Это начало концентрирования и перехода подвижного рассеянного осадочного вещества в более стойкую связную пластичную форму. В концентрированной форме осадочного вещества силы сцепления между частицами усиливаются по мере уплотнения осадка, при этом поры осадка заполнены не морской водой, а иловыми водами.

Полученные нами значения по ^{210}Pb , ^{137}Cs показывают скорости осадконакопления для всего Белого моря $0.4\text{--}4.2 \text{ мм/год}$ (Лисицын и др., 2015а). Этому не противоречат данные о скоростях осадконакопления в прибрежных участках Кандалакшского залива Белого моря $0.3\text{--}1.0 \text{ мм/год}$ (Митяев и др., 2012), в море Бофорта 1.4 мм/год (Bringué and Rochon, 2012) и другие определения скоростей осадконакопления в морях Арктики (Левитан, 2015; Kuzyk et al., 2013; Stein, 2008). В пересчете на абсолютные массы сухого осадка эти значения отвечают интервалу $93\text{--}1260$ при среднем около $310 \text{ г/м}^2/\text{год}$ (см. табл. 1).

Таким образом, скорость седиментации (поток) концентрированной формы вещества в поверхностном слое осадков в среднем составляет $310 \text{ г/м}^2/\text{год}$, что незначительно меньше среднего значения в придонном нефелоидном слое. Это связано с максимальным взаимодействием осадочного вещества с биотой, в осадке происходит переход из биовзвеси в растворы биогенных и иных элементов. Кроме того, процессы рециклинга в поверхностном слое донных осадков идут при самом активном участии бентоса и бактерий (их количество достигает рекордных млн и даже млрд кл/см³ осадка) (Иванов и др., 2013), при этом концентрация органического углерода здесь составляет первые проценты (Леин и др., 2012; Lein and Lisitsyn, 2018) от первичной продукции верхнего слоя вод.

ВЫВОДЫ

Прямые количественные данные по потокам осадочного вещества в водной толще Белого моря, полученные с помощью седиментационных ловушек на обсерваториях АГОС за 15 лет исследований, дали следующие значения: под деятельным слоем в интервале $48\text{--}214$ при среднем $74 \text{ г/м}^2/\text{год}$; в промежуточном слое $54\text{--}298$ при среднем $132 \text{ г/м}^2/\text{год}$; в придонном горизонте $149\text{--}1814$ при среднем $335 \text{ г/м}^2/\text{год}$. Скорости седиментации (по ^{210}Pb , ^{137}Cs) поверхностного слоя донных осадков в пересчете на абсолютные массы сухого осадка отвечают интервалу $93\text{--}1260$ при среднем $310 \text{ г/м}^2/\text{год}$.

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 во время нахождения вещества в самом верхнем слое (наилке). Это подтверждается исследованиями по органическому веществу (Политова и др., 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 биогенных компонентов.

Таким образом, процессы разложения органического вещества наиболее активно идут в двух зонах: 1) верхнем освещенном (деятельном) слое, 2) на границе вода–дно, т.е. в поверхностном слое донных осадков. Количественный переход рассеянных форм осадочного вещества в концентрированные подчиняется линейной зависимости, с локальным максимумом в глубинном нефелоидном слое. Выделяются области сверхбыстрой седиментации — маргинальные фильтры (р. Северная Двина и др.). Многолетние данные по концентрации взвеси и величинам потока рассеянного оса-

Таблица 1. Годовые потоки рассеянного осадочного вещества в толще вод Белого моря по многолетним данным АГОС, а также потоки (абсолютные массы) в поверхностном слое донных осадков (скорости седиментации по ^{210}Pb и ^{137}Cs пересчитаны в абсолютные массы (Лисицын и др., 2015а))

Станция	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, м	Горизонт, м	Величина потока, г/м ² /год
1. Потоки рассеянного осадочного вещества под слоем скачка (25–100 м)					
b-8	64°35′	39°01′	96	25	77
6052	65°18′	38°40′	124	50	51
4936	65°10′	37°57′	97	62	122
1423	65°26′	38°10′	113	63	48
b-15	65°26′	37°40′	132	25	53
b-15	65°26′	37°40′	132	27	75
6056	65°34′	37°45′	139	50	51
6070	65°26′	36°45′	229	60	214
2 (4930)	65°38′	36°09′	249	70	75
3 (4930)	65°38′	36°07′	255	40	85
1107	65°16′	38°43′	113	45	62
Среднее геометрическое					74
Минимум					48
Максимум					214
Стандартное отклонение					48
2. Потоки рассеянного осадочного вещества в промежуточном слое (100–200 м)					
4938	65°15′	38°43′	117	72	219
1423	65°26′	38°10′	113	73	135
1423	65°26′	38°10′	113	83	54
4930	65°38′	36°10′	255	115	298
4930	65°38′	36°10′	255	145	60
2 (4930)	65°38′	36°09′	249	100	82
2 (4930)	65°38′	36°09′	249	108	179
3 (4930)	65°38′	36°07′	255	100	154
3 (4930)	65°38′	36°07′	255	150	170
3 (4930)	65°38′	36°07′	255	185	195
1107	65°16′	38°43′	113	90	96
Среднее геометрическое					132
Минимум					54
Максимум					298
Стандартное отклонение					74
3. Потоки рассеянного осадочного вещества в придонном нефелоидном слое					
b-6a	66°09′	35°03′	267	250	325
b-6a	66°09′	35°03′	267	255	421
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
4944	65°00′	39°22′	67	52	201
4936	65°10′	37°57′	97	83	193
1423	65°26′	38°10′	113	93	286
1423	65°26′	38°10′	113	103	772

Таблица 1. Окончание

Станция	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, м	Горизонт, м	Величина потока, г/м ² /год
1413	65°27′	39°01′	83	63	1008
1413	65°27′	39°01′	83	68	908
1107	65°16′	38°43′	113	100	138
b-15	65°26′	37°40′	132	125	276
b-15	65°26′	37°40′	132	127	354
6056	65°34′	37°45′	139	130	390
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	195	208
3 (4930)	65°38′	36°07′	255	205	282
3 (4930)	65°38′	36°07′	255	215	378
Среднее геометрическое					354
Минимум					138
Максимум					1008
Стандартное отклонение					251

4. Потоки (абсолютные массы) в поверхностном слое донных осадков (0–1 см)

Станция	Широта, с.ш.	Долгота, в.д.	Глубина, м	Скорость осадконакопления, мм/год	Величина потока (абсолютные массы*), г/м ² /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					310
Минимум					93
Максимум					1260
Стандартное отклонение					332

 * При средней плотности сухого осадка (0–20 см) 0.3 г/см³ (Лисицын и др., 2015а).

дочного вещества отчетливо фиксируют устойчивые круглогодичные нефелоидные слои, т.е. распределение рассеянных форм осадочного вещества в толще вод происходит по новым закономерностям, которые удастся выявлять все более отчетливо.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Обработка материала выполнена при финансовой поддержке РНФ № 19-17-00234-П. В рамках Государственного задания ИО РАН на 2022 г. по теме № FMWE-2021-0006 осуществлялась интерпретация полученных данных.

FUNDING

The material was processed with the financial support of the Russian Science Foundation, project no. 19-17-00234-Extended. As part of the State Assignment of the IO RAS for 2022, on topic no. FMWE-2021-0006, the obtained data were interpreted.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бергер В.Я., Примаков И.М.* Оценка уровня первичного продуцирования в Белом море // Биология моря. 2007. Т. 33. № 1. С. 53–58.
- Ветров А.А., Романкевич Е.А.* Первичная продукция и потоки органического углерода на дно в Арктических морях Евразии в 2003–2012 гг. // ДАН. 2014. Т. 454. № 1. С. 97–99.
<https://doi.org/10.7868/S086956521401023X>
- Иванов М.В., Леин А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И., Веслополова Е.Ф., Захарова Е.Е., Прусакова Т.С.* Численность и активность микроорганизмов в пограничной зоне вода осадок и их влияние на изотопный состав углерода органического вещества взвеси и донных осадков Карского моря // Микробиология. 2013. Т. 82. № 6. С. 723–723.
<https://doi.org/10.7868/S0026365613060062>
- Ильяш Л.В., Радченко И.Г., Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Шевченко В.П.* Вертикальный поток фитопланктона и осадочного вещества в Белом море по данным длительной экспозиции седиментационных ловушек // Океанология. 2013. Т. 53. № 2. С. 216–224.
<https://doi.org/10.7868/S0030157413020056>
- Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Буренков В.И.* Сезонная и межгодовая изменчивость биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева, Белого, Черного и Каспийского морей по спутниковым данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. № 1. С. 7–16.
- Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Карали П.Г., Юшманова А.В.* Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998–2017 гг. М.: ООО “ВАШ ФОРМАТ”, 2018. 140 с.
- Левитан М.А.* Скорости седиментации отложений последних пяти морских изотопных стадий в Северном Ледовитом океане // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 470–479.
<https://doi.org/10.7868/S0030157415030119>
- Левитан М.А.* Плейстоценовые отложения Мирового океана. М.: РАН, 2021. 408 с.
- Леин А.Ю., Кравчишина М.Д., Политова Н.В., Саввичев А.С., Веслополова Е.Ф., Мицкевич И.Н., Шевченко В.П., Иванов М.В.* Трансформация взвешенного органического вещества на границе вода-дно в морях Российской Арктики (по изотопным и радиоизотопным данным) // Литология и полезные ископаемые. 2012. № 2. С. 115–115.
- Лисицын А.П.* Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы “живого океана” // Геология и геофизика. 2004. Т. 45. № 1. С. 15–48.
- Лисицын А.П.* Новый тип седиментогенеза в Арктике – ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 1. С. 18–60.
- Лисицын А.П., Кравчишина М.Д., Копелевич О.В., Буренков В.И., Шевченко В.П., Вазюля С.В., Ключевиткин А.А., Новигатский А.Н., Политова Н.В., Филиппов А.С., Шеберстов С.В.* Пространственно-временная изменчивость концентрации взвеси в деятельном слое Белого моря // ДАН. 2013. Т. 453. № 4. С. 440–445.
<https://doi.org/10.7868/S0869565213340173>
- Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Шевченко В.П., Ключевиткин А.А., Кравчишина М.Д., Филиппов А.С., Политова Н.В.* Рассеянные формы осадочного вещества и их потоки в океанах и морях на примере Белого моря (результаты 12 лет исследований) // ДАН. 2014. Т. 456. № 3. С. 355–359.
<https://doi.org/10.7868/S086956521415016X>
- Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Алиев Р.А., Шевченко В.П., Ключевиткин А.А., Кравчишина М.Д.* Сравнительное изучение вертикальных потоков взвеси из водной толщи, скоростей осадкообразования и абсолютных масс донных осадков в Белом море (бассейн Северного Ледовитого океана) // ДАН. 2015а. Т. 465. № 4. С. 489–493.
<https://doi.org/10.7868/S0869565215340198>
- Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Ключевиткин А.А.* Сезонная изменчивость потоков осадочного вещества в Белом море (бассейн Северного Ледовитого океана) // ДАН. 2015б. Т. 465. № 2. С. 229–234.
<https://doi.org/10.7868/S0869565215320201>
- Лисицын А.П., Новигатский А.Н., Шевченко В.П., Ключевиткин А.А., Кравчишина М.Д., Политова Н.В.* Динамика основных компонентов потоков рассеянного осадочного вещества в Белом море // ДАН. 2017. Т. 472. № 6. С. 605–617.
<https://doi.org/10.7868/S0869565217060238>
- Лукашин В.Н., Ключевиткин А.А., Лисицын А.П., Новигатский А.Н.* Малая седиментационная ловушка МСЛ-110 // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 746–750.
- Митяев М.В., Герасимова М.В., Дружкова Е.И.* Вертикальные потоки осадочного вещества в прибреж-

- ных районах Баренцева и Белого морей // Океанология. 2012. Т. 52. № 1. С. 121–130.
- Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Ключиткин А.А., Шевченко В.П., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. Вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества в Арктическом седиментогенезе внутри-континентальных морей // ДАН. 2018. Т. 479. № 2. С. 206–211.
<https://doi.org/10.7868/S0869565218080200>
- Новигатский А.Н., Лисицын А.П., Шевченко В.П., Ключиткин А.А., Кравчишина М.Д., Политова Н.В. Седиментогенез в Белом море: вертикальные потоки рассеянного осадочного вещества и абсолютные массы донных осадков // Океанология. 2020. Т. 60. № 3. С. 429–441.
<https://doi.org/10.31857/S0030157420030077>
- Политова Н.В., Ключиткин А.А., Новигатский А.Н., Ульянова Н.В., Чульцова А.Л., Кравчишина М.Д., Павлова Г.А., Леин А.Ю. Ранний диагенез в современных донных осадках Двинского залива Белого моря // Океанология. 2016. Т. 56. № 5. С. 771–783.
<https://doi.org/10.7868/S0030157416050105>
- Степанец О.В., Борисов А.П., Травкина А.В., Соловьева Г.Ю., Владимиров М.В., Алиев Р.А. Использование радионуклидов ^{210}Pb и ^{137}Cs для геохронологии современных осадков Арктического бассейна в местах захоронения твердых радиоактивных отходов // Геохимия. 2010. № 4. С. 424–429.
- 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. of Radioanalytical and Nuclear Chem. 2007. Vol. 274. Iss. 2. P. 315–321.
<https://doi.org/10.1007/s10967-007-1117-x>
- Bisson K.M., Boss E., Werdell P.J., Ibrahim A., Behrenfeld M.J. Particulate backscattering in the global ocean: a comparison of independent assessments // Geophys. Res. Lett. 2021. Vol. 48. Iss. 2. P. e2020GL090909.
<https://doi.org/10.1029/2020GL090909>
- Bringué M., Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort Sea, Canadian Arctic) // Marine Geol. 2012. Vol. 291. P. 83–96.
<https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.11.004>
- Forest A., Osborne P.D., Fortier L., Sampei M., Lowings M.G. Physical forcings and intense shelf–slope fluxes of particulate matter in the halocline waters of the Canadian Beaufort Sea during winter // Continental Shelf Res. 2015. Vol. 101. P. 1–21.
<https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.03.009>
- Gordeev V.V., Pokrovsky O.S., Shevchenko V.P. The Mixing Zone Between Waters of the Severnaya Dvina River and the White Sea // Biogeochem. of the Atmosphere, Ice and Water of the White Sea / A.P. Lisitsyn, V. Gordeev (Eds.). Environment Part I, Hdb Env. Chem. Springer Int. Publ. AG, 2018. P. 83–113.
https://doi.org/10.1007/698_2018_352
- Honjo S., Doherty K.W. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application // Deep Sea Res. Part A. Oceanographic Res. Papers. 1988. Vol. 35. № 1. P. 133–149.
[https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90062-3](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90062-3)
- Honjo S., Manganini S.J., Krishfield R.A., Francois R. Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: A synthesis of global sediment trap programs since 1983 // Progress in Oceanogr. 2008. Vol. 76. Iss. 3. P. 217–285.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.11.003>
- Honjo S., Krishfield R.A., Eglinton T.I., Manganini S.J., Kempa J.N., Doherty K., Hwang J., McKee T.K., Takizawa T. Biological pump processes in the cryopelagic and hemipelagic Arctic Ocean: Canada Basin and Chukchi Rise // Progress in Oceanogr. 2010. Vol. 85. Iss. 3–4. P. 137–170.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.02.009>
- 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 // Proceedings of the Int. Association of Hydrol. Sci. 2015. Vol. 365. P. 35–41.
<https://doi.org/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 / A.P. Lisitzin, L.L. Demina (Eds.). Environment Part II, Hdb Env. Chem. Springer Int. Publ. AG, 2018. P. 13–48.
https://doi.org/10.1007/698_2018_353
- Kuzyk Z.Z.A., Gobeil C., Macdonald R.W. ^{210}Pb and ^{137}Cs in margin sediments of the Arctic Ocean: Controls on boundary scavenging // Global Biogeochem. Cycles. 2013. Vol. 27. Iss. 2. P. 422–439.
<https://doi.org/10.1002/gbc.20041>
- Lein A.Y., Lisitsyn A.P. Processes of early diagenesis in the Arctic seas (on the example of the White Sea) // Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea / A.P. Lisitzin, L.L. Demina (Eds.). Environment Part II, Hdb Env. Chem. Springer Int. Publ. AG, 2018. P. 165–206.
https://doi.org/10.1007/698_2018_345
- 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 / A.P. Lisitzin, L.L. Demina (Eds.). Environ. Part II, Hdb Env. Chem. Springer Int. Publ. AG, 2018. P. 49–66.
https://doi.org/10.1007/698_2018_278
- Pathirana I., Knies J., Felix M., Mann U. Towards an improved organic carbon budget for the Barents Sea shelf, marginal Arctic Ocean // Climate of the Past Discussions. 2013. Vol. 9. Iss. 4. P. 4939–4986.
<https://doi.org/10.5194/cpd-9-4939-2013>
- Pertsova N.M., Kosobokova K.N. Zooplankton of the White Sea: features of the composition and structure, seasonal dynamics, and the contribution to the formation of

- matter fluxes // *Oceanology*. 2003. Vol. 43. Suppl. 1. P. S108–S122.
- St. John K. Cenozoic ice-rafting history of the central Arctic Ocean: Terrigenous sands on the Lomonosov Ridge // *Paleoceanography*. 2008. Vol. 23. Iss. 1. A1S05. <https://doi.org/10.1029/2007PA001483>
- Stein R. Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment. Elsevier, 2008. Vol. 2. 592 p.
- Szmytkiewicz A., Zalewska T. Sediment deposition and accumulation rates determined by sediment trap and ^{210}Pb isotope methods in the Outer Puck Bay (Baltic Sea) // *Oceanologia*. 2014. Vol. 56. Iss. 1. P. 85–106. <https://doi.org/10.5697/oc.56-1.085>

Vertical Fluxes of Sedimentary Matter and Modern Sedimentation Rates in the White Sea

A. N. Novigatsky¹ *, A. A. Klyuvitkin¹, M. D. Kravchishina¹, N. V. Politova¹,
A. S. Filippov¹, and V. P. Shevchenko¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

*e-mail: novigatsky@ocean.ru

Marine sedimentation was studied using dispersed sedimentary material of the water column in sediment traps in comparison with the surface layer of bottom sediments. Based on the generalization of long-term studies of a small inland sea of the Arctic Ocean, it was possible to establish new regularities of the sedimentary process in the conditions of the Subarctic and Arctic zones. The quantitative transition of dispersed forms of sedimentary matter into concentrated forms (bottom sediments) in the White Sea fluxes a linear relationship, with a local maximum in the deep nepheloid layer. Areas of ultrafast sedimentation are distinguished—marginal filters (Northern Dvina River). Direct quantitative data on the fluxes of sedimentary matter in the water column of the White Sea, obtained using sediment traps at the ADOS observatories over 15 years of research, gave the following values: under the active layer in the range of 48–214 with an average of 74 g/m²/year; in the intermediate layer 54–298 with an average of 132 g/m²/year; in the near-bottom horizon 149–1814 with an average of 335 g/m²/year. The sedimentation rates (for ^{210}Pb , ^{137}Cs) of the surface layer of bottom sediments in terms of the mass accumulation rate (MAR) of dry sediment correspond to the interval 93–1260 with an average of 310 g/m²/year. Long-term data on the concentration of suspended matter and the flux of dispersed sedimentary matter clearly record stable year-round nepheloid layers, i.e. the distribution of scattered forms of sedimentary matter (suspension) in the water column occurs according to new patterns, which can be more clearly identified.

Keywords: Arctic Ocean, White Sea, sediment traps, vertical fluxes, sedimentary material, bottom sediments, sedimentation

REFERENCES

- 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, no. 2, pp. 315–321. <https://doi.org/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, pp. 49–53. <https://doi.org/10.1134/S1063074007010051>
- Bisson K.M., Boss E., Werdell P.J., Ibrahim A., Behrenfeld M.J. Particulate backscattering in the global ocean: a comparison of independent assessments. *Geophys. Res. Lett.*, 2021, vol. 48, no. 2, e2020GL090909. <https://doi.org/10.1029/2020GL090909>
- Bringué M., Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort Sea, Canadian Arctic). *Mar. Geol.*, 2012, vol. 291, pp. 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.11.004>
- Forest A., Osborne P.D., Fortier L., Sampei M., Lowings M.G. Physical forcings and intense shelf-slope fluxes of particulate matter in the halocline waters of the Canadian Beaufort Sea during winter. *Cont. Shelf Res.*, 2015, vol. 101, pp. 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2015.03.009>
- Gordeev V.V., Pokrovsky O.S., Shevchenko V.P. The mixing zone between waters of the Severnaya Dvina river and the White sea. In *Biogeochemistry of the Atmosphere, Ice and Water of the White Sea*. Lisitsyn A.P., Gordeev V., Eds. Springer Int. Publ., 2018, pp. 83–113. https://doi.org/10.1007/698_2018_352
- Honjo S., Doherty K.W. Large aperture time-series sediment traps; design objectives, construction and application. *Deep Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, 1988, vol. 35 (1), pp. 133–149. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90062-3](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90062-3)
- Honjo S., Manganini S.J., Krishfield R.A., Francois R. Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: A synthesis of global sediment trap programs since 1983. *Prog. Oceanogr.*, 2008, vol. 76 (3), pp. 217–285. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2007.11.003>
- Honjo S., Krishfield R.A., Eglinton T.I., Manganini S.J., Kempa J.N., Doherty K., Hwang J., McKee T.K.,

- Takizawa T. Biological pump processes in the cryopelagic and hemipelagic Arctic Ocean: Canada Basin and Chukchi Rise. *Prog. Oceanogr.*, 2010, vol. 85 (3–4), pp. 137–170.
<https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.02.009>
- 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. *Oceanol.*, 2013, vol. 53 (2), pp. 192–199.
<https://doi.org/10.1134/S0001437013020057>
- Ivanov M.V., Lein A.Y., Savvichev A.S., Rusanov I.I., Veslopolova E.F., Zakharova E.E., Prusakova T.S. Abundance and activity of microorganisms at the water-sediment interface and their effect on the carbon isotopic composition of suspended organic matter and sediments of the Kara Sea. *Mikrobiol.*, 2013, vol. 82 (6), pp. 735–742.
<https://doi.org/10.1134/S0026261713060064>
- Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Saling I.V., Vazyulya S.V., Burenkov V.I. Seasonal and inter-annual changeability of bio-optical characteristics in the surface layer of the Barents, White, Black and Caspian seas from satellite data. *Fundam. Prikladn. Gidrofiz.*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 7–16. (In Russ.).
- Kopelevich O.V., Saling I.V., Vazyulya S.V., Glukhovets D.I., Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Karalli P.G., Yushmanova A.V. *Bioopticheskie kharakteristiki morei, omyvayushchikh berega zapadnoi poloviny Rossii, po dannym sputnikovykh skanerov tsвета 1998–2017 gg.* [Bio-optical Characteristics of the Seas, Surrounding the Western Part of Russia, from Data of the Satellite Ocean Color Scanners of 1998–2017]. Moscow: VASH FORMAT Publ., 2018. 140 p.
- 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. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.*, 2015, vol. 365, pp. 35–41.
<https://doi.org/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. In *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Lisitsyn A.P., Demina L.L., Eds. Springer Int. Publ., 2018, pp. 13–48.
https://doi.org/10.1007/698_2018_353
- Kuzyk Z.Z.A., Gobeil C., Macdonald R.W. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs in margin sediments of the Arctic Ocean: Controls on boundary scavenging. *Glob. Biogeochem. Cycles*, 2013, vol. 27 (2), pp. 422–439.
<https://doi.org/10.1002/gbc.20041>
- Lein A.Y., Kravchishina M.D., Politova N.V., Savvichev 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. *Lithol. Miner. Resour.*, 2012, vol. 47 (2), pp. 99–128.
<https://doi.org/10.1134/S0024490212020034>
- Lein A.Y., Lisitsyn A.P. Processes of early diagenesis in the Arctic seas (on the example of the White Sea). In *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Lisitzin A.P., Demina L.L., Eds. Springer Int. Publ., 2018, pp. 165–206.
https://doi.org/10.1007/698_2018_345
- Levitin M.A. Sedimentation rates in the Arctic Ocean during the last five marine isotope stages. *Oceanol.*, 2015, vol. 55 (3), pp. 425–433.
<https://doi.org/10.1134/S000143701503011X>
- Levitin M.A. *Pleistotsenovyie otlozheniya Mirovogo okeana* [Pleistocene Deposits of the World Ocean]. Moscow: RAN, 2021. 408 p.
- Lisitzin A.P. Sediment fluxes, natural filtration, and sedimentary systems of a “living ocean”. *Russ. Geol. Geophys.*, 2004, vol. 45 (1), pp. 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. Geophys.*, 2010, vol. 51 (1), pp. 12–47.
<https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.12.002>
- Lisitzyn A.P., Kravchishina M.D., Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Shevchenko V.P., Vazyulya S.V., Klyuvitkin A.A., Novigatsky A.N., Politova N.V., Filippov A.S., Sheberstov S.V. Spatial and temporal variability in suspended particulate matter concentration within the active layer of the White Sea. *Dokl. Earth Sci.*, 2013, vol. 453 (2), pp. 1228–1233.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X13120052>
- 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 (1), pp. 635–639.
<https://doi.org/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.*, 2015, vol. 465 (2), pp. 1253–1256.
<https://doi.org/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.*, 2015, vol. 465 (1), pp. 1182–1186.
<https://doi.org/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 (2), pp. 252–255.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X17020295>
- Lukashin V.N., Klyuvitkin A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N. The MSL-110 small sediment trap. *Oceanol.*, 2011, vol. 51(4), pp. 699–703.
<https://doi.org/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. *Oceanol.*, 2012, vol. 52 (1), pp. 112–121.
<https://doi.org/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.*, 2018, vol. 479 (1), pp. 384–389.
<https://doi.org/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. In *Sedimentation Processes in the White Sea: The White Sea*. Lisitsyn A.P., Demina L.L., Eds. Springer Int. Publ., 2018, pp. 49–66.
https://doi.org/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. *Oceanol.*, 2020, vol. 60 (3), pp. 372–383.
<https://doi.org/10.1134/S0001437020030078>
- Pathirana I., Knies J., Felix M., Mann U. Towards an improved organic carbon budget for the Barents Sea shelf, marginal Arctic Ocean. *Clim. Past Discuss.*, 2013, vol. 9 (4), pp. 4939–4986.
<https://doi.org/10.5194/cpd-9-4939-2013>
- Pertsova N.M., Kosobokova K.N. Zooplankton of the White Sea: features of the composition and structure, seasonal dynamics, and the contribution to the formation of matter fluxes. *Oceanology*, 2003, vol. 43 (1), pp. 108–S122.
- 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). *Oceanol.*, 2016, vol. 56 (5), pp. 702–713.
<https://doi.org/10.1134/S0001437016050106>
- St. John K. Cenozoic ice-rafting history of the central Arctic Ocean: Terrigenous sands on the Lomonosov Ridge. *Paleoceanogr.*, 2008, vol. 23 (1), A1S05.
<https://doi.org/10.1029/2007PA001483>
- Stein R. *Arctic Ocean Sediments: Processes, Proxies, And Paleoenvironment*. Elsevier, 2008, vol. 2. 592 p.
- Stepanets O.V., Borisov A.P., Travkina A.V., Solov'eva G.Y., Vladimirov M.V., Aliev R.A. Application of the ^{210}Pb and ^{137}Cs radionuclides in the geochronology of modern sediments at the storage sites of solid radioactive wastes in the Arctic Basin. *Geochem. Int.*, 2010, vol. 48 (4), pp. 424–429.
<https://doi.org/10.1134/S0016702910040087>
- Szmytkiewicz A., Zalewska T. Sediment deposition and accumulation rates determined by sediment trap and ^{210}Pb isotope methods in the Outer Puck Bay (Baltic Sea). *Oceanol.*, 2014, vol. 56 (1), pp. 85–106.
<https://doi.org/10.5697/oc.56-1.085>
- 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 (1), pp. 44–46.
<https://doi.org/10.1134/S0001437011020196>