© А.Н. Новигатский, А.А. Клювиткин, А.П. Лисицын, 2018, Океанологические исследования, 2018, Том 46, № 2, С. 167–179

УДК 551.463.8 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).12

СКОРОСТИ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ, ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА И АБСОЛЮТНЫЕ МАССЫ ОСАДКОВ В ШЕЛЬФОВОЙ ОБЛАСТИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

А.Н. Новигатский, А.А. Клювиткин, А.П. Лисицын

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
117997, Москва, Нахимовский проспект, д. 36, e-mail:novigatsky@ocean.ru

Статья поступила в редакцию 22.06.2018, одобрена к печати 10.09.2018

Применен новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод, полученного с помощью седиментационных ловушек (вертикальный поток осадочного вещества), в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков (абсолютные массы). Это открывает возможность in situ (по потокам осадочного вещества в толще вод) изучать современную седиментацию в поверхностных слоях осадков. И на современном технологическом уровне понимать связь осадочных процессов с природной средой и климатом. Открывается возможность и для решения обратной задачи – по скоростям (или абсолютным массам) осадков восстанавливать потоки вещества и химических элементов в морях геологического прошлого.

Ключевые слова: вертикальные потоки осадочного вещества, скорости осадконакопления, Северный Ледовитый океан, арктический шельф

Введение

Для осадочного процесса в Арктике характерен особый тип седиментогенеза – ледовый морской, который соответствует для суши континентальному седиментогенезу зон холодных полярных пустынь, северной тундры и тайги. Здесь господствуют терригенные осадки, специфичные по способам подготовки осадочного вещества, его транспортировки и отложения. Особенно большую роль для всей зоны играют существование воды в водосборе и на поверхности моря большую часть года в твердом виде (снег, лед), многолетняя мерзлота на шельфе и водосборе, а также минимальное значение биогенных процессов. Верхний деятельный слой моря, где идут процессы фотосинтеза, подготовки первопищи для всех организмов, большую часть года или круглогодично (области паковых льдов) перекрыт припайными и дрейфующими льдами, а также снегом, блокирующим фотосинтез. Длительная полярная ночь и малое поступление биогенных элементов с речным стоком в сочетании с самыми низкими температурами для Северного полушария – все это важнейшие факторы природной среды Арктики, они и определяют ход осадочного процесса (Lisitzin, 2002, 2010).

Северный Ледовитый океан является океаническим бассейном с сильно выраженной сезонностью осадконакопления, такие параметры, как площадь развития морских льдов, твердый сток рек, абразия берегов, первичная продукция, температуры поверхностной водной массы и приземного слоя атмосферы, демонстрируют

ярко выраженную зональность и сезонность в течение года (Levitan et al., 2012).

От зимнего сезона к летнему (от полярной ночи к полярному дню) резко меняется не только освещенность и тепло, но и площадь распространения морских льдов, их толщина и сплоченность. Ледовитость максимальна в апреле–мае и минимальна в августе, соответственно, площадь развития морских льдов в Северном полушарии меняется от 15,1 млн. км² зимой до 8,4 млн. км² летом, т.е. почти в два раза, с минимально известными площадями летом в начале XXI века (Ivanov et al., 2016).

Столь же резко выражена сезонность в годовой истории твердого речного стока. В паводок реки сбрасывают порядка 45–65% взвеси от годового выноса (иногда – до 70%). На реках Западной Арктики это происходит в мае, а Восточной – в июне (Gordeev, 2006).

Очевидно, что максимальная интенсивность абразии берегов тоже приходится на летний сезон, когда прибрежные воды свободны от однолетних морских, припайных и речных льдов. В это же время все упомянутые типы льдов летом тают, освобождая заключенный в них осадочный материал для поступления в водную толщу и далее – в донные осадки. Все эти причины способствуют максимальному поступлению осадочного вещества в бассейн Северного Ледовитого океана именно в летний сезон (Lisitzin, 2002).

Среди основных видов зональности осадконакопления, известных в океанических бассейнах (циркумконтинентальной, широтной, вертикальной и тектоно-магматической), в Северном Ледовитом океане особенно четко выражена циркумконтинентальная зональность. В зонах смешения речной и морской воды идет лавинная седиментация и изменение состава речной взвеси (явление маргинального фильтра). Это область внутреннего шельфа, именно здесь происходит локализация огромных количеств речной взвеси (здесь задерживается до 93% речной взвеси) (Lisitzin, 2004). Массы рыхлого осадочного материала в береговой зоне при абразии (в том числе – термоабразии) берегов также в основном остаются в пределах внутреннего шельфа, не проникая далее в пелагическую область (Grigoriev et al., 2004). Это подтверждается и прямыми исследованиями морской взвеси в Белом, Баренцевом и Карском морях (Lisitzin et al., 1994; Shevchenko et al., 1998; Gaye et al., 2007; Politova et al., 2012; Lein et al., 2012).

Материалы и методы

Используя высокоразрешающие методы в рамках программы ИО РАН «Система Белого моря» впервые очень подробно, в отличие от других морей, в Белом море в течение пятнадцати лет проводились 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) (Lisitzin et al., 2014). Это дает представление о ежемесячных (и более длительных) прямых количественных определениях вертикальных потоков с непрерывным отбором вещества с разных

глубин круглый год, что позволяет получить прямые данные в пространстве по глубине и во времени о концентрации (мг/л), скорости осаждения (мм/год) и вертикальных потоках (г/м²/год), т.е. абсолютных массах осадочного вещества в толще вод и верхнем слое донных осадков (на границе вода – осадок) и его изменений в ходе осаждения.

Для определения скорости современного осадконакопления в Белом море верхний слой осадков (0–20 см) отбирался мультикорером, или трубкой Неймисто, т.е. без нарушения поверхностного слоя. Определение скоростей проводилось параллельно несколькими методами: с помощью радионуклидного анализа (^{137}Cs, ^{210}Pb) (Aliev et al., 2007), а также методами лито- и биостратиграфии (Polyakova et al., 2014). Величины придонных вертикальных потоков осадочного вещества определялись прямым измерением седиментационными ловушками в составе автоматических обсерваторий АГОС (Lisitzin et al., 2015) (рис. 1).

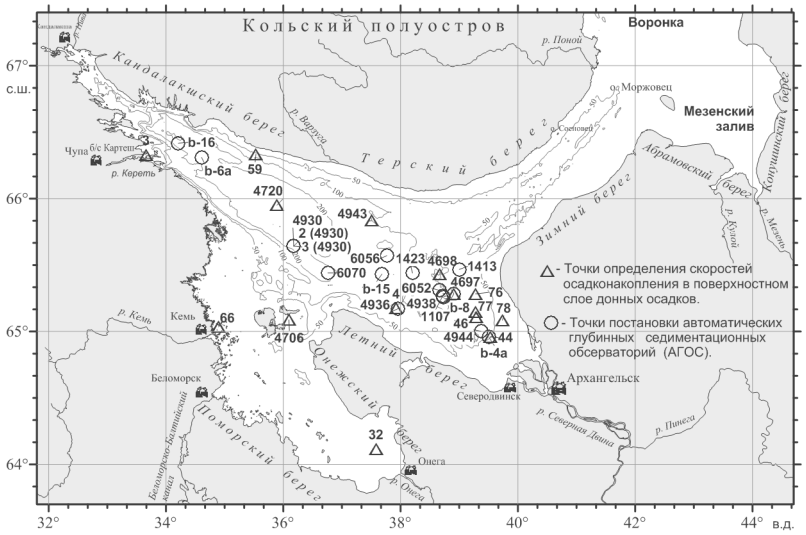

Рис. 1. Расположение в Белом море обсерваторий АГОС годовой экспозиции и точки определения потоков (абсолютных масс) в поверхностном слое донных осадков (скорости седиментации по ^{210}Pb и ^{137}Cs пересчитаны в абсолютные массы)

Скорости осадконакопления в Северном Ледовитом океане

В значениях скоростей седиментации в Северном Ледовитом океане отмечается огромная пестрота, особенно на континентальных окраинах. Установлен разброс значений порядка от 500 см/тыс. лет в маргинальных фильтрах (депоцентрах зон смешения) и некоторых фьордах до нулевых и даже отрицательных значений (в зонах донной эрозии), например, на приподнятых участках дна Баренцева и Карского морей. Если двигаться в пелагическом направлении, то можно уловить тенденцию общего резкого падения средней скорости седиментации от сотен и десятков сантиметров в тысячу лет на континентальных окраинах до первых сантиметров в тысячу лет (а иногда и менее) в глубоководных котловинах и на подводных хребтах и поднятиях (Lisitzin, 2002; Levitan et al., 2012).

В настоящее время существуют пока только фрагментарные сведения по скоростям осадконакопления в Северном Ледовитом океане (табл. 1). Выделяются мелководная и глубоководная зоны, отличающиеся по скоростям, составу и строению донных отложений. Мелководная (шельфовая) зона включает участки с глубинами менее 100 м и отличается преимущественно активной гидродинамикой. Для этой зоны характерно в недавней истории неоднократное осушение (снижение уровня на 100–120 м) полностью или частично, т.е. неоднократное изменение условий осадкообразования.

Таблица 1. Скорости осадконакопления в Северном Ледовитом океане, см в 1000 лет

Район	Скорость осадконакопления, см в 1000 лет	Источник
Хребет Ломоносова	0,1-0,3	Morris et al., 1985
Центральная Арктика	0,2	Sellen et al., 2009
Хребет Менделеева	0,15	Not et al., 2010
Хребет Менделеева	0,1-0,4	Gusev et al., 2012
Моря Российской Арктики	1-300	Куликов и др., 1970
Моря Российской Арктики	1-112	Levitan et al., 2012
Чукотское море	10-50	Pavlidis et al., 1996
Баренцево море	20-115	Ivanova et al., 2002
Белое море (губа Чупа)	30-100	Mityaev et al., 2012
Белое море	30-400	Aliev et al., 2007

Глубоководная зона (пелагиаль) занимает участки, расположенные на глубинах более 100 м. Для нее характерны слабая гидродинамическая активность и устойчивая аккумуляция осадков в течение почти всего позднечетвертичного времени, в том числе и в наиболее глубоководных ее участках – желобах и впадинах. Изменения условий осадкообразования были здесь сравнительно незначительными.

Рассматривая скорости накопления осадков, необходимо иметь в виду различия условий накопления их на разных участках морей, зависящие от удаленности области сноса, от рельефа дна и гидрологического режима морей. Вместе с тем необходимо учитывать, что условия накопления осадков были неоднозначными и на разных этапах осадконакопления на одних и тех же участках моря. Поэтому приходится говорить лишь об осредненных скоростях накопления осадков на определенных участках на том или ином временном этапе.

Литературный анализ позволяет дать следующую оценку осредненных скоростей накопления осадков в морях Российской Арктики. Так, в глубоководной зоне (>100 м) скорости накопления осадков в голоцене составляют в юго-западной части Карского моря 30–50 см в 1000 лет, а местами и более 50 см, то есть на порядок и более превышают скорости осадкообразования в пелагиали (1–10 мм/1000 лет или

0,1–1 см/1000 лет). В южной части желоба Воронина скорость осадконакопления превышает 50 см в 1000 лет, в средней части уменьшается до 20 см в 1000 лет, а в самой северной части желоба – до 10 см в 1000 лет. В то же время в средней и северной частях желоба Св. Анны скорости накопления голоценовых осадков колеблются от 3 до 8 см в 1000 лет (рис. 2) (Куликов и др., 1970).

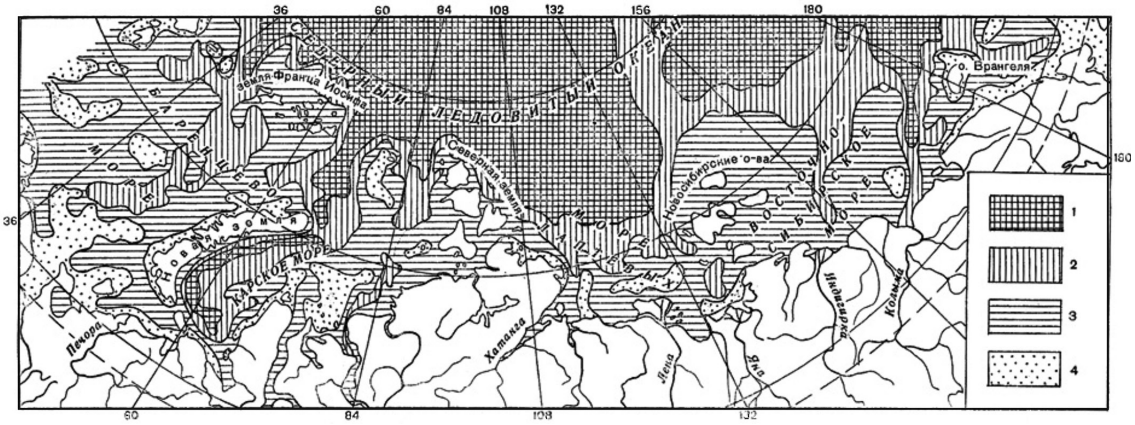

Рис. 2. Схематическая карта зон осадконакопления в морях российской Арктики. 1 – зона устойчивой аккумуляции глинистых осадков. Скорость осадконакопления от 1–2 см до 10–30 см в 1000 лет; 2 – зона устойчивой аккумуляции осадков разной зернистости. Скорость осадконакопления 50–300 см в 1000 лет; 3 – зона преимущественной аккумуляции осадков разной зернистости. Скорость осадконакопления 5–50 см в 1000 лет; 4 – зона преимущественного размыва донных отложений. Скорость осадконакопления 0–5 см в 1000 лет (Куликов и др., 1970)

Для глубоководной зоны морей Лаптевых и Чукотского пока имеется очень мало данных о скоростях осадконакопления. В глубоководной зоне Чукотского моря средние скорости накопления голоценовых отложений превышают 15 см в 1000 лет. Осредненные скорости накопления в северной части желоба Св. Анны составляют 3–4 см в 1000 лет. В центральной части Новоземельской впадины скорость осадконакопления превышает 10 см в 1000 лет (Куликов и др., 1970).

Мелководная зона арктических морей характеризуется сравнительно слабым накоплением голоценовых осадков, что связано, в том числе, с осушкой при оледенениях. Вместе с тем в пределах этой зоны имеются существенные различия в осадконакоплении на отдельных ее участках, обусловленные различиями рельефа дна и динамичности вод. Понижения дна и участки, расположенные на путях разноса тонкодисперсного осадочного материала, выносящегося в море речными водами, являются местами преобладающей аккумуляции голоценовых осадков. В то же время для более мелководных участков, находящихся в зоне активного волнового воздействия, а также для крутых склонов и участков, подверженных влиянию сильных приливно-отливных течений, характерно преобладание выноса алеврито-глинистой части осадочного материала и потому незначительная аккумуляция голоценовых осадков. Осадконакопление на этих участках происходит эпизодически и, в основном, тонкие осадки смываются течениями.

Осредненные скорости накопления голоценовых отложений в пределах мелководной зоны колеблются от нескольких миллиметров до 12–15 см в 1000 лет на участках, где вскрыты верхнеплейстоценовые отложения, до 100 см и более в 1000 лет в понижениях дна. Для мелководной зоны Баренцева моря характерна замедленная седиментация, и только в редких случаях скорость накопления голоценовых осадков измеряется величиной 4–8 мм в тысячелетие. Довольно часто встречаются зоны размыва, где обнажаются подстилающие отложения разного возраста и происхождения (Куликов и др., 1970).

Для морей Российской Арктики составлена схема зон осадконакопления в арктических морях, где выделены четыре зоны, характеризующиеся различным режимом осадконакопления: устойчивой аккумуляции глинистых осадков, устойчивой аккумуляции осадков разной зернистости, преимущественной аккумуляции осадков разной зернистости и преимущественного размыва (рис. 2) (Куликов и др., 1970; Levitan et al., 2012).

Таким образом, скорости седиментации в донных осадках Мирового океана меняются в широких пределах от менее 1 мм/год до 1000 мм/год и более (Лисицын, 1991). На континентальных окраинах Северного Ледовитого океана (СЛО) встречаются значения порядка 10 мм/год (в депоцентрах зон смешения речных и морских вод, проливе Фрама и некоторых фьордах), не редки также нулевые и даже отрицательные значения в зонах донной эрозии (участки дна Белого, Баренцева, Карского и др. морей) при средней скорости осадконакопления в пелагиали СЛО 0,01 мм/год, т.е. 10 мм/1000 лет (Stein, 2008).

Сопоставление вертикальных потоков рассеянного осадочного вещества (взвеси) из водной толщи и абсолютных масс донных осадков

Подробные исследования потоков осадочного материала седиментационными ловушками проводились на месте гибели атомной подводной лодки «Комсомолец» в Норвежском море В.Н. Лукашиным на протяжении 5 лет (Lukashin, 2000). На границе с Баренцевым морем на континентальном склоне о. Медвежий были определены вертикальные потоки равные 17,9 мг/м²/сут. на горизонте 133 м и 517 мг/м²/ сут. на горизонте 268 м (глубина моря 283 м). При этом состав материала в ловушках отличается: в верхней ловушке присутствовали пеллеты, органический детрит, редкий терригенный материал, а в ловушке, поставленной в придонном нефелоидном слое, значительную часть составляет хлопьевидный и другой детрит с терригенными частицами с более редкими пеллетами.

На севере архипелага Новая Земля (бухта Русская Гавань) (76°16.0’ с.ш., 62°27.1’ в.д., гл. 104 м), поток осадочного вещества резко возрастает по мере увеличения глубины с 346 мг/м²/сут. на горизонте 70 м до 7660 мг/м²/сут. на горизонте 85 м (в 19 м от дна) (Politova et al., 2012). Вещество ловушек – агрегаты детрита, состоявшие почти наполовину из гидрослюды, пеллет, минеральных частиц алевритовой и мелкой песчаной фракций (главным образом, кварц, плагиоклаз, эпидот,

полевые шпаты). Это объясняется привносом обломочного материала течением, имеющим большую скорость и направленным со стороны берега с находящимся там ледником Шокальского.

Полученные нами значения по 210Pb и 137Cs показывают скорости осадконакопления для всего Белого моря в интервале от 0,4 до 4,2 мм/год, в пересчете на абсолютные массы сухого осадка эти значения отвечают интервалу 93–1260 г/м²/год при среднем около 310 г/м²/год (табл. 2). Этому не противоречат данные о скоростях осадконакопления в прибрежных участках Кандалакшского залива Белого моря – 0,3–1,0 мм/год (70–233 г/м²/год) (Mityaev et al., 2012), в море Бофорта 1,4 мм/год (325 г/м²/год) (Bringue, 2012) и другие определения по Арктике (Stein, 2008).

Таблица 2. Оценка скорости осадконакопления в Белом море в верхнем слое осадка, метод радиохронологии (Aliev et al., 2007)

Станция	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Глубина, м	Скорость осадконакопления, мм/год	Абсолютные массы*, г/м²/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

*при средней плотности сухого осадка (0–20 см) 0,3 г/см³.

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 в интервале 149–1814 г/м²/год при среднем – 335 г/м²/год (табл. 3).

Таблица 3. Придонные интегральные (годовые) потоки рассеянного осадочного вещества в Белом море

Станция	Широта (с.ш.)	Долгота (в.д.)	Глубина, м	Горизонт, м	Величина придонного потока, г/м²/год
b-16	66º34’	33º47’	236	226	357
b-4a	64º57’	39º31’	50	30	752
b-8	64º35’	39º01’	96	85	330
b-15	65º26’	37º40’	132	125	276
b-15	65º26’	37º40’	132	127	354
b-6a	66º09’	35º03’	267	250	325
b-6a	66º09’	35º03’	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

Более низкие значения абсолютных масс верхнего слоя донных осадков в сравнении с придонными потоками (при их сравнении в сходных единицах) связаны с деструкцией органического вещества и всей биогенной триады во время нахождения вещества в самом верхнем слое (наилке), кроме того, дна достигает только 1/100 часть первичной продукции. Это подтверждается исследованиями по органическому веществу (Lein et al., 2013), где показано, что при длительном пребывании частиц в самом верхнем слое осадка продолжается потребление органического углерода бентосом и бактериями (выедание), а также частичное растворение других компонентов биогенной триады ($CaCO_3$ и $SiO_{2ам.}$).

Наиболее высокие значения скоростей осадконакопления (и потоков осадочного вещества) выявлены в маргинальных фильтрах, на границе река – море (р. Сев. Двина, Онега, Кемь), а также вдоль стокового течения р. Сев. Двина в Двинском заливе (Lisitzin et al., 2014; 2015). Кроме того, высокие скорости осадконакопления обнаружены в глубоководных участках Бассейна, Кандалакшского и Двинского

залива в областях депрессий дна (Кандалакшский грабен и др.), они частично связаны и со сложными склоновыми процессами (мутьевые потоки, гравититы и др.) на дне моря.

Линейная зависимость между вертикальными потоками осадочного вещества и абсолютными массами донных осадков показывает достаточно высокую статистическую значимость (R^2=0,8; n=15), а уравнение регрессии на графике позволяет впервые прогнозировать скорости осадконакопления и абсолютные массы по прямым данным вертикальных потоков осадочного вещества в придонном слое (Lisitzin et al., 2015). Более высокие значения придонных потоков осадочного вещества встречены на ст. 6062 (между о. Большой Соловецкий и о. Анзерский): они в разы превышают абсолютные массы 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, т.е. не создает существенных препятствий для осаждения под действием силы тяжести (Lisitzin et al., 2014). Кроме того, на отдельных станциях выделяются участки быстрой и сверхбыстрой седиментации в устьевых (ст. b-4a) и склоновых (ст. 6070 и 3) областях (Лисицын, 1991).

Заключение

Применен новый подход в изучении морского осадконакопления с использованием рассеянного осадочного материала толщи вод в седиментационных обсерваториях в сопоставлении с поверхностным слоем донных осадков. Такой подход открывает возможность in situ (по потокам осадочного вещества в толще вод) прогнозировать в первом приближении современную седиментацию в поверхностном слое донных осадков, на новом технологическом уровне прослеживать изменения природной среды и климата. Открывается возможность для решения обратной задачи – по скоростям (или абсолютным массам) осадков восстанавливать потоки вещества и химических элементов в морях геологического прошлого. Это тема будущих исследований.

Обработка и получение материала выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 14-27-00114-П. В рамках Государственного задания ИО РАН по теме № 0149-2018-0016 и Программы ПП РАН 49.1.2. (тема № 0149-2018-0031) осуществлялась интерпретация полученных данных.

Литература

Куликов Н.Н., Лапина Н.Н., Семенов Ю.П., Белов Н.А., Спиридонов М.А. Стратификация и скорости накопления донных отложений Арктических морей СССР. Северный Ледовитый океан и его побережье в кайнозое // Ленинград: Гидрометеоиздат, 1970. С. 34–41.

Лисицын А.П. Процессы терригенной седиментации в морях и океанах / М.: Наука, 1991. 272 с.

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 // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2007. Vol. 274(2). P. 315–321.

Bringue A., Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort sea, Canadian Arctic) // Marine Geology. 2012. Vol. 291–294. No. 3. P. 83–96.

Gaye B., Fahl K., Kodina L. A., Lahajnar N., Nagel B., Unger D., Gebhardt A. C. Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared to sediments: Bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen isotopes, sterols and fatty acids // Continental Shelf Research. 2007. Vol. 27(20). P. 2570–2594.

Grigoriev M.N., Rachold V., Schirrmeister L., Hubberten H.W. Organic carbon input to the Arctic Seas through coastal erosion. In The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Ed. R. Stein and R. Macdonald // Springer–Verlag Berlin. 2004. P. 41–45.

Gordeev V.V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean // Geomorphology. 2006. Vol. 80(1–2). P. 94–104.

Gusev E.A., Maksimov F.E., Novikhina E.S., Kuznetsov V.Yu., Levchenko S.B., Zherebtsov I.E., Baranova N.G. On stratigraphy of bottom sediments from Mendeleev Rise (the Arctic Ocean) Region // Vestnik Saint-Petersburg University. 2012. Vol. 4. P. 102–115.

Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N. V., Repina I., Sandø A. B., Smedsrud L. H., Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: A suggested positive feedback // Journal of Physical Oceanography. 2016. Vol. 46 (5). P. 1437–1456.

Ivanova E.V., Murdmaa I.O., Duplessy J.C., Paterne M. Late Weichselian to holocene paleoenvironments in the Barents Sea // Global and Planetary Change. 2002. Vol. 34(3-4). P. 209–218.

Levitan M.A., Syromyatnikov K.V., Kuz'mina T.G. Lithological and geochemical characteristics of recent and Quaternary sedimentation in the Arctic Ocean // Geochemistry International. 2012. Vol. 50 (7). P. 559–573.

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 // Lithology and Mineral Resources. 2012. Vol. 47(2). P. 99–128.

Lein A.Y., Makkaveev P.N., Savvichev A.S., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Dara O.M., Flint M.V. Transformation of suspended particulate matter into sediment in the Kara Sea in September of 2011 // Oceanology. 2013. Vol. 53(5). P. 570–606.

Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Vinogradov M.E., Severina O.V., Vavilova V.V., Mitzkevich I.N. Particle fluxes in the Kara Sea and Ob and Yenisei estuaries // Oceanology. 1994. Vol. 34(5). P. 748–758.

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» // Russian Geology and Geophysics. 2004. Vol. 45(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 // Russian Geology and Geophysics. 2010. Vol. 51(1). P. 12–47.

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 // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 456. No. 1. P. 635–639.

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 // Doklady Earth Sciences. 2015. Vol. 465. No. 2. P. 1253–1256.

Lukashin V.N., Bogdanov Y.A., Shevchenko V. P., Rusakov V.Y., Isaeva, A.B. A study of vertical fluxes of sedimentary material and its composition in the Norwegian Sea in the summer periods of 1991–1995 // Geochemistry International. 2000. 38(2). P. 169–183.

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(1). P. 112–121.

Morris T.H., Clark D.L., Blasco S.M. Sediments of the Lomonosov Ridge and Makarov Basin: A. Pleistocene Stratigraphy for the North Pole // Bull. Geol. Soc. America. 1985. Vol. 96. P. 901–910.

Not C., Hillaire-Marcel C. Time constraints from 230Th and 231Pa data in late Quaternary, low sedimentation rate sequences from the Arctic Ocean: An example from the northern Mendeleev Ridge // Quaternary Science Reviews. 2010. Vol. 29. P. 3665–3675.

Pavlidis Y.A., Ogorodnikov V.I., Shelekhova E.S., Wahsner M. Lithology and geochemistry of modern sediments of the Chukchi Sea. Surface-Sediment Composition and Sedimentary Processes in the Central Arctic Ocean and Along the Eurasian Continental Margin // Reports on Polar Research. 1996. Vol. 212. P. 119–125.

Politova N.V., Shevchenko V.P., Zernova V.V. Distribution, composition, and vertical fluxes of particulate matter in Bays of Novaya Zemlya Archipelago, Vaigach Island at the end of summer // Advances in Meteorology. 2012. *http://dx.doi.org/10.1155/2012/259316*.

Polyakova Y.I., Novichkova Y.A., Lisitzin A.P., Bauch H.A., Rybalko A.Y. Modern data on the biostratigraphy and geochronology of White Sea sediments // Doklady Earth Sciences. 2014. Vol. 454. No. 2. P. 169–174.

Sellen E., Jakobsson M., Frank M., Kubik P.W. Pleistocene variations of beryllium isotopes in central Arctic Ocean sediments // Global and Planetary Change. 2009. Vol. 68. P. 38–47.

Shevchenko V.P., Ivanov G.I., Burovkin A.A., Dzhinoridze R.N., Zernova V.V., Polyak L.V., Shanin S.S. Sedimentary material flows in the St. Anna Trough and eastern Barents Sea // Doklady Earth Sciences. 1998. Vol. 359. No. 3. P. 400–403.

Stein R. Arctic Ocean sediments. Processes, proxies, and paleoenvironment / Amsterdam: Elsevier, 2008. 592 p.

THE SPEED OF SEDIMENTATION, VERTICAL FLOW OF MATTER, AND THE ABSOLUTE MASS OF PRECIPITATION IN THE SHELF REGION OF THE RUSSIAN ARCTIC

A.N. Novigatsky, A.A. Klyuvitkin, A.P. Lisitzin

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

Submitted 22.06.2018, accepted 10.09.2018

A new approach has been applied in the study of marine sedimentation using the scattered sedimentary material of the water column obtained by means of sediment traps (vertical

sediment fluxes), in comparison with the surface layer of bottom sediments (absolute masses). This opens the possibility in situ (through sediment fluxes in the water column) to study modern sedimentation in the surface layers of sediments, and at the current technological level understand the relationship of sedimentary processes with the natural environment and climate. Opportunity to solve the inverse problem - on the velocities (or absolute masses) of precipitation is restored to restore the fluxes of matter and chemical elements in the seas of the geological past.

Keywords: vertical sediment fluxes, sedimentation traps, Arctic Ocean, Arctic shelf

References

Aliev R., Bobrov V., Kalmykov S., Melgunov M., Vlasova I., Shevchenko V., Novigatsky A., and Lisitzin A. Natural and artificial radionuclides as a tool for sedimentation studies in the Arctic region. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2007, Vol. 274(2), pp. 315–321.

Bringue A. and Rochon A. Late Holocene paleoceanography and climate variability over the Mackenzie slope (Beaufort sea, Canadian Arctic). *Marine Geology*, 2012, Vol. 291–294, No. 3, pp. 83–96.

Gaye B., Fahl K., Kodina L. A., Lahajnar N., Nagel B., Unger D., and Gebhardt, A. C. Particulate matter fluxes in the southern and central Kara Sea compared to sediments: Bulk fluxes, amino acids, stable carbon and nitrogen isotopes, sterols and fatty acids. *Continental Shelf Research*, 2007, Vol. 27(20), pp. 2570–2594.

Grigoriev M.N., Rachold V., Schirrmeister L., and Hubberten H.W. Organic carbon input to the Arctic Seas through coastal erosion. In The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Ed. R. Stein and R. Macdonald. Springer–Verlag Berlin, 2004, pp. 41–45.

Gordeev V.V. Fluvial sediment flux to the Arctic Ocean. *Geomorphology*, 2006, Vol. 80(1–2), pp. 94–104.

Gusev E.A., Maksimov F.E., Novikhina E.S., Kuznetsov V.Yu., Levchenko S.B., Zherebtsov I.E., and Baranova N.G. On stratigraphy of bottom sediments from Mendeleev Rise (the Arctic Ocean) Region. *Vestnik Saint-Petersburg University*, 2012, Vol. 4, pp. 102–115.

Ivanov V., Alexeev V., Koldunov N. V., Repina I., Sandø A. B., Smedsrud L. H., and Smirnov A. Arctic Ocean heat impact on regional ice decay: A suggested positive feedback. *Journal of Physical Oceanography*, 2016, Vol. 46 (5), pp. 1437–1456.

Ivanova E.V., Murdmaa I.O., Duplessy J.C., and Paterne M. Late Weichselian to holocene paleoenvironments in the Barents Sea. *Global and Planetary Change*, 2002, Vol. 34(3–4), pp. 209–218.

Kulikov N.N., Lapina N.N., Semenov Yu.P., Belov N.A., and Spiridonov M.A. Stratifikaciya i skorosti nakopleniya donnyh otlozhenij Arkticheskih morej SSSR. Severnyj Ledovityj okean i ego poberezh'e v kajnozoe. *Leningrad. Gidrometeoizdat*, 1970, pp. 34–41.

Levitan M.A., Syromyatnikov K.V., and Kuz'mina T.G. Lithological and geochemical characteristics of recent and Quaternary sedimentation in the Arctic Oceanт. *Geochemistry International*, 2012, Vol. 50(7), pp. 559–573.

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., and 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(2), pp. 99–128.

Lein A.Y., Makkaveev P.N., Savvichev A.S., Kravchishina M.D., Belyaev N.A., Dara O.M., and Flint M.V. Transformation of suspended particulate matter into sediment in the Kara Sea in

September of 2011. *Oceanology*, 2013, Vol. 53(5), pp. 570–606.

Lisitzin A.P. Processy terrigennoj sedimentacii v moryah i okeanah. Moskva: Nauka, 1991, 272 p.

Lisitzin A.P., Shevchenko V.P., Vinogradov M.E., Severina O.V., Vavilova V.V., and Mitzkevich I.N. Particle fluxes in the Kara Sea and Ob and Yenisei estuaries. *Oceanology*, 1994, Vol. 34(5), pp. 748–758.

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". *Russian Geology and Geophysics*, 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. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, Vol. 51(1), pp. 12–47.

Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Filippov A.S., and 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. *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 456, No.1, pp. 635–639.

Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Aliev R.A., Shevchenko V.P., Klyuvitkin A.A., and 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. *Doklady Earth Sciences*, 2015, Vol. 465, No. 2, pp. 1253–1256.

Lukashin V.N., Bogdanov Y.A., Shevchenko V. P., Rusakov V.Y., and Isaeva, A.B. A study of vertical fluxes of sedimentary material and its composition in the Norwegian Sea in the summer periods of 1991–1995. *Geochemistry International*, 2000, Vol. 38(2), pp. 169–183.

Mityaev M.V., Gerasimova M.V., and Druzhkova E.I. Vertical particle fluxes in the coastal areas of the Barents and White Seas. *Oceanology*, 2012, Vol. 52(1), pp. 112–121.

Morris T.H., Clark D.L., and Blasco S.M. Sediments of the Lomonosov Ridge and Makarov Basin: A. Pleistocene Stratigraphy for the North Pole. *Bull. Geol. Soc. America*, 1985, Vol. 96, pp. 901–910.

Not C. and Hillaire-Marcel C. Time constraints from 230Th and 231Pa data in late Quaternary, low sedimentation rate sequences from the Arctic Ocean: An example from the northern Mendeleev Ridge. *Quaternary Science Reviews*, 2010, Vol. 29, pp. 3665–3675.

Pavlidis Y.A., Ogorodnikov V.I., Shelekhova E.S., and Wahsner M. Lithology and geochemistry of modern sediments of the Chukchi Sea. Surface-Sediment Composition and Sedimentary Processes in the Central Arctic Ocean and Along the Eurasian Continental Margin. *Reports on Polar Research*, 1996, Vol. 212, pp. 119–125.

Politova N.V., Shevchenko V.P., and Zernova V.V. Distribution, composition, and vertical fluxes of particulate matter in Bays of Novaya Zemlya Archipelago, Vaigach Island at the end of summer. *Advances in Meteorology*, 2012, *http://dx.doi.org/10.1155/2012/259316*.

Polyakova Y.I., Novichkova Y.A., Lisitzin A.P., Bauch H.A., and Rybalko A.Y. Modern data on the biostratigraphy and geochronology of White Sea sediments. *Doklady Earth Sciences*, 2014, Vol. 454, No. 2, pp. 169–174.

Sellen E., Jakobsson M., Frank M., and Kubik P.W. Pleistocene variations of beryllium isotopes in central Arctic Ocean sediments. *Global and Planetary Change*, 2009, Vol. 68, pp. 38–47.

Shevchenko V.P., Ivanov G.I., Burovkin A.A., Dzhinoridze R.N., Zernova V.V., Polyak L.V., and Shanin S.S. Sedimentary material flows in the St. Anna Trough and eastern Barents Sea. *Doklady Earth Sciences*, 1998, Vol. 359, No. 3, pp. 400–403.

Stein R. Arctic Ocean sediments. Processes, proxies, and paleoenvironment. Amsterdam: Elsevier., 2008, 592 p.