

УДК 551.465

РАССЕЯННОЕ ОСАДОЧНОЕ ВЕЩЕСТВО В МОРСКОЙ КРИОСИСТЕМЕ: СНЕГ–ДРЕЙФУЮЩИЙ ЛЕД–ПОДЛЕДНАЯ ВОДА АРКТИКИ И АНТАРКТИКИ

© 2020 г. А. Н. Новигатский¹, *, А. П. Лисицын¹, А. А. Клювиткин¹

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

*e-mail: novigatsky@ocean.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 09.06.2020 г.

Принята к публикации 22.06.2020 г.

Выполнена сравнительная характеристика осадочного вещества в снежно-ледовом покрове около-полюсного района Арктики и припайном льду Антарктики. Выявлены основные закономерности распределения рассеянного осадочного вещества в морской криосистеме снег–морской лед–подледная вода Арктики и Антарктики. Рассчитаны потоки осадочного вещества из подошвы морских льдов на дно.

Ключевые слова: рассеянное осадочное вещество, морской лед, Арктика, Антарктика.

DOI: 10.31857/S0030157420050196

ВВЕДЕНИЕ

Главными факторами, определяющими условия среды в ледовых зонах, являются низкие температуры, длительная полярная ночь и короткий полярный день. Низкая температура, господствующая большую часть года, определяет переход воды во всех сферах (атмо-, гидро-, литосфере) в твердую форму, т.е. в лед. В атмосфере — это преобладание снега — главного вида атмосферных осадков этой зоны, в морях — образование почти непрерывного на протяжении года ледового покрова на морской поверхности толщиной 1–5 м, на суше — возникновение покровных, горных и других видов оледенения, а также очень широкое распространение подземного оледенения — многолетней мерзлоты, которая в ряде мест продолжается далеко в море под толщей донных осадков [26, 28].

Образование и таяние морских льдов имеет важное значение для климата и гидрологических условий среды высоких широт. Однако очень мало внимания пока обращается на то, что это также процесс глобального геохимического значения, процесс, определяющий и условия жизни, и осадкообразования в ледовых зонах. Лед захватывает химические элементы, компоненты природного и антропогенного происхождения из атмосферы, воды и берегового комплекса, а затем переносит их из областей внутреннего шельфа в открытый океан [3, 4, 7, 15–17, 27, 43].

В Арктике многолетние морские льды являются важным геологическим фактором, влияющим на формирование осадочного покрова Северного

Ледовитого океана и Северной Атлантики. Основная часть морских припайных антарктических льдов в отличие от арктических паковых льдов существует только зимой. Происходит снос с Антарктического ледникового щита в океан большого количества снега, который при низких температурах воздуха не тает и образует на поверхности моря слой снежурки толщиной до нескольких десятков сантиметров. Снежурка, накапливаясь на поверхности моря, смерзается и превращается в молодой лед. Впоследствии по мере увеличения толщины ледяного покрова образуется растущий антарктический припайный лед [20, 26].

Основным источником минеральных частиц для снежного покрова являются почвы суши. Зимой, когда поверхность Арктики покрыта снегом и льдом, основной вклад вносит дальний перенос, в том числе и антропогенных частиц. Растительные волокна длиной до нескольких сотен мкм и пыльца сухопутных растений переносятся ветром на сотни км, их поступление эоловым путем отмечено во всех областях Арктики [14]. Пыльца цветковых растений, споры мхов и грибов, продуцируемые растениями в тех или иных районах Евразии и Канады, поднимаясь в высокие слои атмосферы, с воздушными потоками достигают высоких широт вплоть до Северного полюса [42].

Морской лед — это постоянно живущие образование, как бы двойная губка, которая всасывает вещество из воды и из атмосферы. При многолетнем повторении этого процесса (в Арктике) происходит обогащение взвесью верхних, т.е. самых древних, слоев многолетнего льда. Образуются

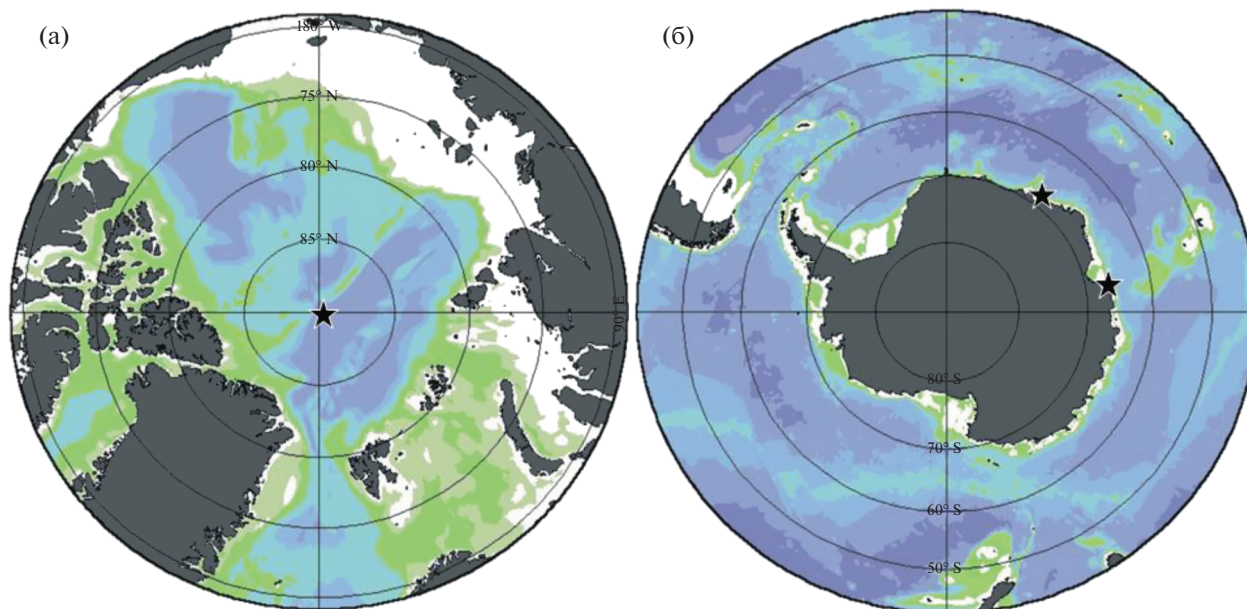


Рис. 1. Схема ледовых полигонов в Арктике (а) и Антарктике (б).

“грязные льды”, которые особенно типичны для областей распространения многолетних льдов с наибольшей повторностью и экспозицией захватов. Содержание осадочного вещества в морских льдах оказалась значительно выше, чем в подстилающих их морских водах. Это как бы концентратор осадочного вещества, причем не только взвешенного, но и растворенного [26, 33, 41].

Вещество в толще льда трансформируется (смешивается эоловая и водная взвеси), идет своеобразное его преобразование в потоке ледовой взвеси в толще дрейфующего по поверхности океана льда. Морской лед высоких широт следует рассматривать как особую подсистему цикла углерода. Толща морского льда заселена сообществами бактерий, фито- и зоопланктона, фито- и зообентоса. Заселенность льда подвержена сезонным изменениям [6, 38]. Планктонные диатомовые, заключенные во льду, обеспечивают при его таянии первоначальное весеннее цветение вокруг льдин. Ледовые водоросли служат источником пищи для гетеротрофов и являются основой ледовой экосистемы и первичными источниками потоков углерода в биотоп [1].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе представлены материалы, собранные в рамках Международного полярного года в экспедиции Института океанологии “Панарктическая ледовая дрейфующая экспедиция” (ПАЛЭКС) в апреле 2007, 2008 и 2012 гг. в Арктике [10, 11, 40], а также в Антарктике (рис. 1а–1б) в Российской Антарктической экспедиции (46 и 48 РАЭ) [8, 9]. Целью экспедиций являлся сбор

информации о состоянии снежно-ледово-водной системы в высоких широтах Земли.

На ледовых полигонах по единой методике проводился отбор проб больших объемов снега, ледовых кернов, подледной воды и постановка седиментационных ловушек под ледовым покровом [7]. Снежно-ледовые пробы растапливали при $T = 20^{\circ}\text{C}$. Полученный осадочный материал для определения массовой концентрации фильтровали стандартным методом под вакуумом 400 мбар через мембранные ядерные фильтры (Ø пор 0.45 мкм, Ø фильтра 47 мм, полотно производства ОИЯИ, г. Дубна). Для определения содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) пробы фильтровали под вакуумом 200 мбар через стекловолоконистые фильтры GF/F фирмы Whatman (Ø фильтра 47 мм, эффективный размер пор 0.7 мкм), прокаленные при $t = 450^{\circ}\text{C}$ [22]. Содержание $C_{\text{орг}}$ в пробах определяли методом сухого сжигания на анализаторе АН-7560 (с точностью 3–6 отн. %) в ИО РАН. Данные по соотношению C/N получены на анализаторе углерода TOC-Vcph фирмы Shimadzu в Лаборатории Отто Шмидта ААНИИ.

Подледные потоки осадочного вещества определялись методом седиментационных ловушек [29], установленных под дрейфующими льдами на разных горизонтах. Описание осадочного материала выполнено при помощи оптического микроскопа Olympus BX50, а также сканирующего электронного микроскопа VEGA-3sem TESCAN (Чехия) с системой рентгеноспектрального микроанализа Oxford INCA Energy350 (Великобритания) в ИО РАН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В толще дрейфующих льдов покрытых снегом на Северном полюсе нам удалось уловить два максимума криозолей: 1-й верхний (снеговой) обогащенный вымыванием из атмосферы снегом. Второй связан с дальним региональным и глобальным переносом — в подошве льда, где новообразованный лед захватывает взвешенное вещество из подледной воды, поскольку частицы взвеси являются ядрами кристаллизации внутриводного льда (рис. 2а). Снежный горизонт содержит больше органического углерода (C_{org}), чем ледовый и подледный горизонты, где в большом количестве присутствует биогенное вещество (рис. 2а) [6], это связано с влиянием дальнего переноса эолового вещества и аккумуляцией его в снежном покрове, что подтверждается данными по углеводородному загрязнению [7] и микрокристаллическому углероду [40]. Поступление вещества эоловым путем отмечено практически во всех областях Арктики, вплоть до Северного полюса [16].

Дальний эоловый перенос в Антарктике с американского и африканского континентов незначителен. Поэтому при образовании снежно-ледового припая происходит перераспределение органического углерода в основном между льдом и водой. Характерная черта антарктического припайного льда — развитие диатомовых не только на нижней, но и на верхней поверхности льдов. Связано это с тем, что молодой лед под тяжестью снега погружается в воду, и в результате верхний, снежно-водный слой заселяется морскими планктонными организмами — диатомеями. Поэтому их концентрации высоки и в верхних частях льда по сравнению со снегом (рис. 2б). В припайном льду содержание C_{org} , по сравнению с подледной водой, значительно выше, особенно в коричнево-буrom диатомовом слое (нижний и средний горизонт).

Полученное нами соотношение биогенных элементов C/N (в среднем 5.6, $n = 4$) антарктического снежно-ледового покрова указывает на генезис органического углерода, так, для свежего морского планктона характерно соотношение, равное 7 [37], в литературе встречаются значения, равные 6.5 [31, 38], что указывает на незначительную деградацию органического вещества в морском льду.

В связи с тем, что основное распределение животных организмов связано с поверхностью льда (кровля и подошва) [30], концентрирование органического углерода происходит в барьерных зонах “снег—лед” и “вода—лед” (рис. 2а—2б). Эти зоны даже при низких температурах остаются активной биогеохимической средой, где развиваются автотонные процессы, способствующие образованию и концентрированию органического углерода.

Сопоставляя криозоли в паковом арктическом и припайном антарктическом льдах, очевидно, что в антарктическом припае концентрация криозолей на порядок выше: 7.8 мг/л против 0.76 мг/л

(рис. 2а—2б). Это связано с высокой продуктивностью антарктических вод и, как следствие — более интенсивное заселение планктонных организмов в рыхлой структуре припайного льда. Кроме того, арктический паковый снежно-ледовый покров содержит существенную долю антропогенного углерода, что в антарктическом припае практически отсутствует.

Снежный покров Северного Ледовитого океана является благоприятным коллектором как минеральных частиц, так и частиц биогенного происхождения: пыльца, споры растений, различные более или менее крупные фрагменты растений — кутикулы, фрагменты пыльцевых мешков; створки диатомовых водорослей. Аккумулируясь на поверхности снежного покрова, они хорошо сохраняются и со временем становятся фоссильными [42].

По данным электронно-микроскопического анализа частицы, содержащиеся в снежно-ледовом покрове района Северного полюса, состоят в основном из органического вещества (обломки панцирей фитопланктона, споры, пыльца, диатомовые водоросли, одноклеточные организмы и др.) и минеральных частиц (минеральные зерна и глинистые агрегаты) (рис. 2в).

В верхней части толщи морского льда прослеживается более высокое содержание минеральных частиц (до 30%), это многолетняя аккумуляция вещества на поверхности пакового льда (эоловая концентрация вещества). В биогенной составляющей преобладают диатомовые водоросли и силикофлагелляты, в сумме составляя 50%. В средней части толщи льда присутствует пыльца, остатки наземной растительности и одноклеточные организмы, особенно в нижней части разреза льда (рис. 2в). В подледной воде литогенная составляющая выражена слабее, чем в снежно-ледовом покрове. Здесь во взвеси преобладает именно биогенная часть, отмечается высокая встречаемость бактериальных ассоциаций и биогенных остатков, в основном в виде обломков панцирей и раковин, а также спор диатомовых (рис. 2в).

В припайном льду Антарктиды биогенная составляющая значительно преобладает над терригенной составляющей, достигая в процентном соотношении 80—90% (рис. 2г). Это и не удивительно, поскольку поставка терригенного материала с континента незначительна, а преобладающие ветра в основном дуют с ледника в сторону океана. Поэтому как терригенная органика, так и минеральные зерна находятся в сильно подчиненном положении перед активно продуцируемой морской органикой в морских припайных льдах Антарктиды. В составе преобладают панцири диатомовых водорослей и других видов фитопланктона, одноклеточные, а также бактериальные колонии. Незначительное количество терригенной взвеси захватывается из поверхностной воды при формировании льда, и в дальнейшем свою количественную характеристику не меняет.

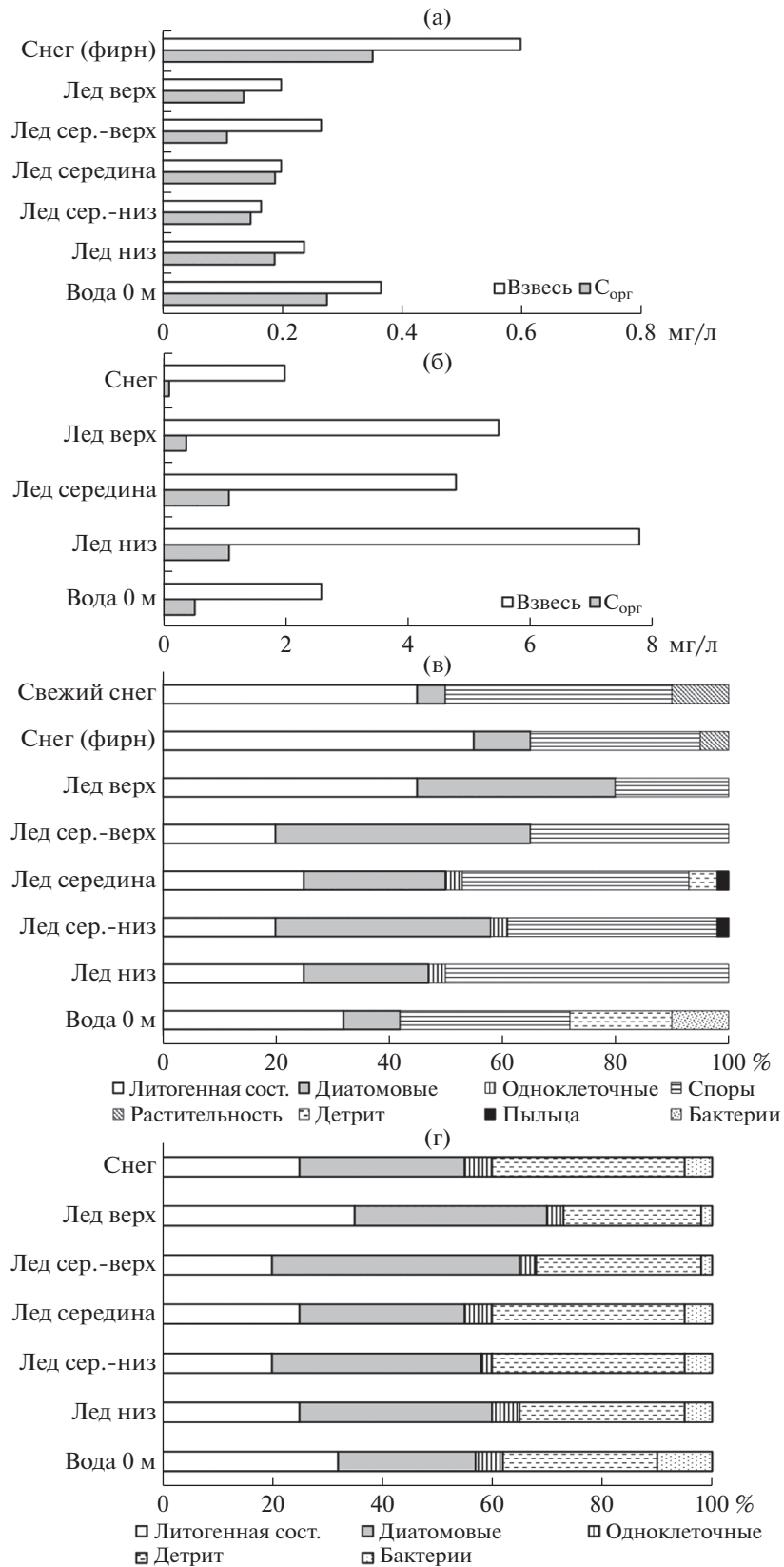


Рис. 2. Распределение вещества на вертикальном разрезе снег–лед–подледная вода: концентрации взвешенных частиц в талой воде (мг/л) и концентрация взвешенного органического углерода (мг/л) в Арктике (а) и в Антарктике (б); количественное содержание и вещественный состав осадочного материала в системе снег–лед–морская вода подледного слоя в Арктике (в) и в Антарктике (г).

Таблица 1. Подледные вертикальные потоки осадочного вещества: общий поток ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$) и его биогенная составляющая – поток $S_{\text{орг}}$ ($\text{мгC}/\text{м}^2/\text{сут}$), по нашим и литературным данным в Центральной Арктике и Антарктике

| Координаты | Дата | Горизонт, м | Общий поток, $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ | Поток $S_{\text{орг}}$, $\text{мгC}/\text{м}^2/\text{сут}$ | Источник |
|------------------------------|-----------------|-------------|---|--|---------------|
| Центральная Арктика | | | | | |
| 89°37.02' N; 08° 37.12' W | 04.2007 | 20 | 52 | 10 | Данная работа |
| | 04.2008 | 30 | 27 | 4.4 | |
| | | 70 | 31 | 7.8 | |
| 85°17' N 122°32' E | 09.2012 | 5 | 100 | – | [24] |
| | | 25 | 150 | 11 | |
| 81°04.5' N; 138°54.0' E | 04.1995–04.1996 | 150 | 12–196 | 5.1 | [19] |
| Антарктика | | | | | |
| 66°29.93' S; 92°58.19' E | 04.2001 | 25 | 36 | 4.1 | Данная работа |
| | | 50 | 57 | 11 | |
| | | 75 | 56 | 16 | |
| 69°12.57' S; 76°17.49' E | 05.2001 | 25 | 34 | 3.1 | Данная работа |
| | | 50 | 29 | 1.3 | |
| | | 75 | 55 | 0.8 | |
| 68°3.74' S; 54°54.55' W | 11.2004 | 10 | 108 | 8.1 | [31] |
| | | 70 | 52 | 6.2 | |
| | 12.2004 | 10 | 95 | 20 | |
| | | 70 | 53 | 4.0 | |

Углерод в Мировом океане и в биосфере Земли в целом является основой всех органических соединений и, следовательно, вовлечен во все биологические и биохимические циклы. Часть оседающего органического вещества достигает донных осадков и активно участвует в формировании осадочной толщи, являясь основным источником энергии в диагенезе [36, 39].

В условиях Арктики, по вертикальным потокам выделяется два пояса высоких значений: 1) маргинальные фильтры рек [5, 25, 32] и 2) кромка тающих дрейфующих льдов. Первый пояс характерен для всех климатических зон. Второй – только для умеренных и ледовых зон, его особенность – самые низкие значения потоков зимой под ледовым покровом. Эти две закономерности характерны для водной толщи Арктики [12, 13, 32, 41].

Всплеск развития водорослей и потока $S_{\text{орг}}$ в Арктике приходится на весенне-летний период. Максимум седиментационных потоков сдвинут относительно пика развития фитопланктона в результате запаздывания развития зоопланктона. Величины потоков $S_{\text{орг}}$ в арктических морях, измеренные на нижней границе фотического слоя, имеют очень широкий диапазон изменений (от 0.15 до 1200 $\text{мгC}/\text{м}^2/\text{сут}$). Среднегодовые величины потоков в Арктике оказываются значительно ниже летних и сильно зависят от длительности существования ледяного покрова [2, 13, 18–24, 34].

Полученные нами прямые данные о вертикальных потоках ловушками приобретают особый интерес. Характерен состав подледных пото-

ков рассеянного осадочного вещества на Северном полюсе в конце зимы: общий поток 37 $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$, поток органического углерода 7.4 $\text{мгC}/\text{м}^2/\text{сут}$ (таблица 1). Эти величины согласуются с зимними значениями подледных потоков рассеянного осадочного вещества, измеренными в других районах Арктики. В среднем, для зимнего сезона, значения потоков составили: общий поток около 50 $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$, поток органического углерода 4.5 $\text{мгC}/\text{м}^2/\text{сут}$ [10, 11, 19, 23, 24].

Наши измерения подледных потоков под припайом Антарктики в начале зимнего сезона показывают следующие средние значения: общий поток 43 $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$, поток органического углерода 4.1 $\text{мгC}/\text{м}^2/\text{сут}$ (таблица), эти порядки величин хорошо согласуются с подобными результатами исследований наших коллег на припайном ледовом лагере в море Уэдделла [31]. Необходимо отметить, что в весенне-летний сезон потоки осадочного вещества могут увеличиваться на порядок [35, 38].

Таким образом, значения подледных потоков в Арктике и Антарктике измеренные в зимнем сезоне, близки в своих средних величинах, это обусловлено схожестью условий ледовой седиментации высоких широт. В морских льдах одинаковы механизмы накопления осадочного материала, которые происходят в основном за счет первичного захвата взвеси новообразованным льдом, и дальнейшей биологической активности планктона внутри льдов, а также эоловой поставки материала со снегом. В дальнейшем, при таянии морского льда идет активная разгрузка накопленного

материала в областях разгрузки: для Арктики — это пролив Фрама, для Антарктики — это обширная область Южного океана. Безусловно, присутствуют и особенности, так, для морских льдов Арктики характерно большее содержание терригенного и антропогенного материала (в том числе и терригенной органики), поскольку Арктика окружена континентами, с которых материал активно выдувается ветрами, а также присутствует достаточно мощный речной сток, который также поставляет огромное количество терригенного и антропогенного материала, захватываемого морскими льдами. Условия в Антарктике иные, так, континент практически полностью покрыт ледовым щитом, небольшие выходы скальных пород не являются мощными поставщиками терригенного материала, поэтому морской лед Антарктики накапливает значительную долю биогенной составляющей. Это и показали наши исследования, так, содержание органического углерода в морском льду Антарктики в разы выше, чем в Арктике.

В высоких широтах с особенной четкостью выступает определяющее влияние среды, климата и биоты на ход осадочного процесса на всех стадиях от подготовки рассеянного осадочного вещества в ледовых водосборах до транспортировки льдами разных типов с траекториями их движения и областями разгрузки. В ходе дрейфа льдов происходит перенос огромных масс льда и рассеянного осадочного материала, включенного в его толщу, на тысячи километров, разгружаясь в ледовом депоцентре высоких широт: в Арктике — в проливе Фрама и Гренландском море, в Антарктике — практически во всей области Южного океана.

Источник финансирования. Обработка материала выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 20-17-00157; С/Н-анализ за счет гранта № 19-17-00234), определение органического углерода проводилось за счет средств РФФИ (грант № 19-05-00022), интерпретация полученных данных осуществлялась в рамках государственного задания ИО РАН на 2019–2020 гг. по теме № 0149-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агатова А.И., Лапина Н.М.* Органическое вещество во льдах высоких широт Баренцева моря // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М.: Новый мир, 2001. С. 222–225.
2. *Дриц А.В., Кравчишина М.Д., Пастернак А.Ф. и др.* Роль зоопланктона в вертикальном потоке вещества в Карском море и море Лаптевых в осенний сезон // Океанология. 2017. Т. 57. № 6. С. 934–948.
3. *Левитан М.А.* Скорости седиментации отложений последних пяти морских изотопных стадий в Северном Ледовитом океане // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 470–479.
4. *Левитан М.А., Лейченко Г.Л.* История кайнозойского оледенения Антарктиды и седиментации в Южном океане // Литология и полезные ископаемые. 2014. № 2. С. 115–136.
5. *Лисицын А.П., Шевченко В.П., Виноградов М.Е. и др.* Потоки осадочного вещества в Карском море и в эстуариях Оби и Енисея // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 748–758.
6. *Мельников И.А.* Экосистема арктического морского льда. М.: ИО АН СССР, 1989. 191 с.
7. *Немировская И.А., Новигатский А.Н.* Углеводороды в снежно-ледяном покрове и водах Северного Ледовитого океана // Геохимия. 2003. № 6. С. 651–660.
8. *Немировская И.А., Новигатский А.Н.* Распределение органических соединений и взвеси в морских льдах восточной Антарктиды // Докл. РАН. 2004. Т. 397. № 5. С. 670–674.
9. *Немировская И.А., Новигатский А.Н.* Органические соединения в атмосфере, криосфере и воде Антарктики // Арктика и Антарктика. 2007. Т. 39(5) С. 136–155.
10. *Новигатский А.Н., Лисицын А.П.* Район Северного полюса — первые данные о седиментосистеме: снег-дрейфующий лед-подледная вода // Докл. РАН. 2018. Т. 483. № 4. С. 447–451.
11. *Новигатский А.Н., Лисицын А.П.* Концентрация, состав и потоки рассеянного осадочного вещества в снежно-ледовом покрове околополюсного района Арктики // Океанология. 2019. Т. 59. № 3. С. 449–453.
12. *Романкевич Е.А., Ветров А.А.* Цикл углерода в арктических морях России. М.: Наука, 2001. 302 с.
13. *Романкевич Е.А., Ветров А.А., Виноградов М.Е., Ведерников В.И.* Компоненты цикла углерода в Арктических морях России. Потоки углерода с суши, углерод в донных осадках, элементы баланса // Океанология. 2000. Т. 40. № 3. С. 363–372.
14. *Шевченко В.П.* Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 231 с.
15. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И. и др.* Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // Докл. РАН. 2002. Т. 383. № 3. С. 385–389.
16. *Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р. и др.* Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 75. С. 106–118.
17. *Шевченко В.П., Маслов А.В., Лисицын А.П. и др.* Систематика Сг, Со и редкоземельных элементов в осадочном материале дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорга // Литосфера. 2017. Т. 17. № 3. С. 59–70.
18. *Bauerfeind E., Leipe T., Ramseier R.O.* Sedimentation at the permanently ice-covered Greenland continental shelf (74°57.7' N/12°58.7' W): significance of biogenic and lithogenic particles in particulate matter flux // Journal of Marine Systems. 2005. V. 56. P. 151–166.
19. *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 Research I. 2007. V. 54. P. 1256–1272.
20. *Geological History of the Polar Oceans: Arctic versus Antarctic / Bleil U., Thiede J. (Eds.).* Kluwer Academic Publishers. 1990. V. 308. 815 p.

21. *Hargrave B.T., Von Bodungen B. et al.* Seasonal variability in particle sedimentation under permanent ice cover in the Arctic Ocean // *Continental Shelf Research*. 1994. V. 14. № 2–3. P. 279–293.
22. *Kravchishina M.D., Lein A.Y., Sukhanova I.N. et al.* Genesis and spatial distribution of suspended particulate matter concentrations in the Kara Sea during maximum reduction of the Arctic ice sheet // *Oceanology*. 2015. V. 55(4). P. 623–643.
23. *Lalande C., Forest A., Barber D.G. et al.* Variability in the annual cycle of vertical particulate organic carbon export on Arctic shelves: Contrasting the Laptev Sea, Northern Baffin Bay and the Beaufort Sea // *Continental Shelf Research*. 2009. V. 29. № 17. P. 2157–2165.
24. *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.
25. *Lisitzin A.P.* The continental–ocean boundaries in a marginal filter in the World Oceans // *Biogeochemical cycling and sediment ecology* / J.S. Gray et al. (Eds.). Dordrecht: Kluwer, 1999. P. 69–109.
26. *Lisitzin A.P.* Sea-ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean: Recent and Past. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 563 p.
27. *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.
28. *Lisitzin A.P., Shevchenko V.P.* Glacial-marine sedimentation // *Encyclopedia of Marine Geosciences* / J. Harff, M. Meschede, S. Petersen, J. Thiede (Eds.). Berlin: Springer, 2016. P. 288–294.
29. *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.
30. *Melnikov I.A.* Winter production of sea ice algae in the western Weddell Sea // *Journal of marine systems*. 1998. V. 17(1–4). P. 195–205.
31. *Michels J., Dieckmann G.S., Thomas D.N. et al.* Short-term biogenic particle flux under late spring sea ice in the western Weddell Sea // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2008. V. 55(8–9). P. 1024–1039.
32. *Novigatsky A.N.* Dispersed sedimentary material in the snow and ice cover of the Central Arctic and its fluxes to the bottom // *The Arctic: Current Issues and Challenges* / Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Malov A.I. (Eds.). NY: Nova Science Publishers, 2020. P. 393–404.
33. *Nürnberg D., Wollenburg I., Dethleff D. et al.* Sediments in Arctic sea ice: Implications for entrainment, transport and release // *Marine Geology*. 1994. V. 119(3–4). P. 185–214.
34. *O'Brien M.C., Macdonald R.W., Melling H., Iseki K.* Particle fluxes and geochemistry on the Canadian Beaufort Shelf: Implications for sediment transport and deposition // *Continental Shelf Research*. 2006. V. 26. P. 41–81.
35. *Pilskaln C.H., Manganini S.J., Trull T.W. et al.* Geochemical particle fluxes in the Southern Indian Ocean seasonal ice zone: Prydz Bay region, East Antarctica // *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2004. V. 51(2). P. 307–332.
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* / Stein R., Macdonald R.W. (Eds.). Berlin: Springer, 2004. P. 33–41.
37. *Redfield A.C., Ketchum B.H., Richards F.A.* The influence of organisms on the composition of sea water // *The Sea* / M.N. Hill (Ed.). New York: Wiley, 1963. P. 26–77.
38. *Rigual-Hernández A.S., Pilskaln C.H., Cortina A. et al.* Diatom species fluxes in the seasonally ice-covered Antarctic Zone: New data from offshore Prydz Bay and comparison with other regions from the eastern Antarctic and western Pacific sectors of the Southern Ocean // *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. 2019. V. 161. P. 92–104.
39. *Romankevich E.A.* Geochemistry of Organic Matter in the Ocean. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1984. 342 p.
40. *Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Lisitzin A.P. et al.* Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic / *Implications and Consequences of Anthropogenic Pollution in Polar Environments*. From Pole to Pole / R. Kallenborn (Ed.). Berlin: Springer, 2016. P. 59–73.
41. *Stein R.* Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment // *Developments in Marine Geology*. V. 2. Elsevier, 2008. 592 p.
42. *Ukrainitseva V.V., Sokolov V.T., Kuz'min S.B., Visnevskiy A.A.* Investigation of snow cover and an air of atmosphere in vicinities of the North Pole using the pollen analysis method // *Polar Geography*. 2009. V. 32(3–4). P. 143–152.
43. *Vancoppenolle M., Meiners K.M., Michel C. et al.* Role of sea ice in global biogeochemical cycles: emerging views and challenges // *Quaternary science reviews*. 2013. V. 79. P. 207–230.

Dispersed Sedimentary Matter in the Marine Cryosystem: Snow–Drifting Ice–Icewater Arctic and Antarctic

A. N. Novigatsky^{a, #}, A. P. Lisitzin^a, A. A. Klyuvitkin^a

^a*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

[#]*e-mail: novigatsky@ocean.ru*

A comparative characteristic of sedimentary matter in the snow-ice cover of the near-polar region of the Arctic and the fast ice of the Antarctic is performed. The main laws of the distribution of dispersed sedimentary matter in the marine cryosystem of snow-sea ice-ice water of the Arctic and Antarctic are obtained. The fluxes of sedimentary matter from the bottom of sea ice to the bottom are calculated.

Keywords: dispersed sedimentary matter, sea ice, Arctic, Antarctic.