

УДК 551.465

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

© 2020 г. А. Н. Новигатский<sup>1, \*</sup>, А. П. Лисицын<sup>1</sup>, А. А. Клювиткин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт 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 снежурой толщиной до нескольких десятков сантиметров. Снежура, 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

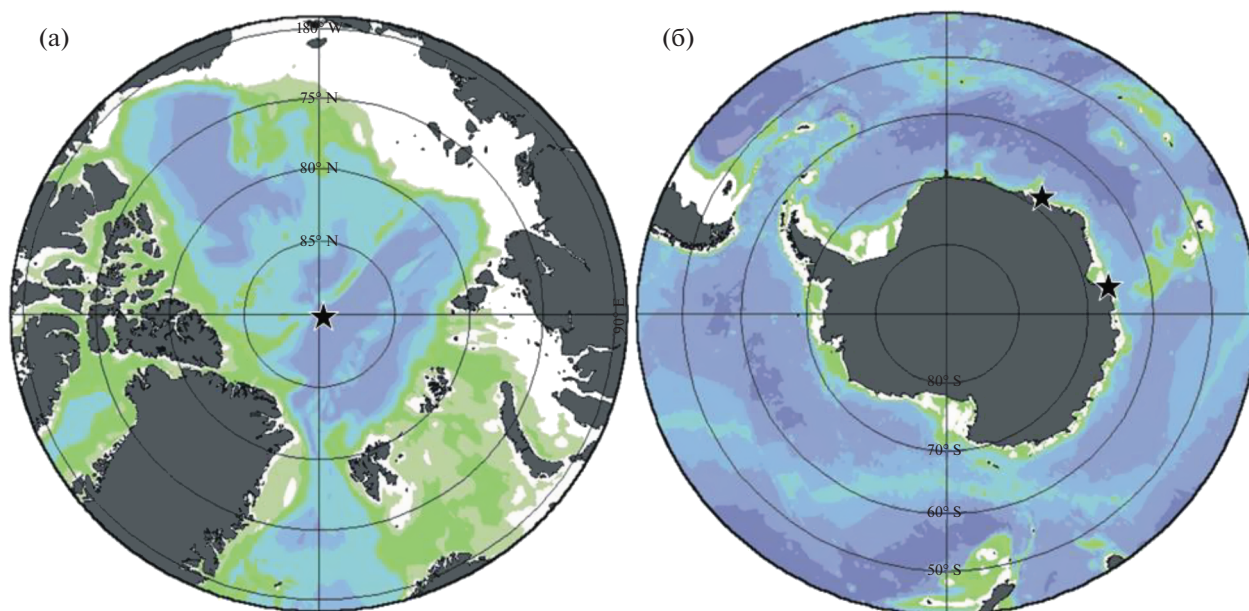


Рис. 1. Схема ледовых полигонов в Арктике (а) и Антарктике (б).

“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 лду, 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 ( $\Phi$  пор 0.45 мкм,  $\Phi$  фильтра 47 мм, полотно производства ОИЯИ, г. Дубна). Для определения содержания органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) пробы фильтровали под вакуумом 200 мбар через стекловолоконные фильтры GF/F фирмы Whatman ( $\Phi$  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 автохтонные 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

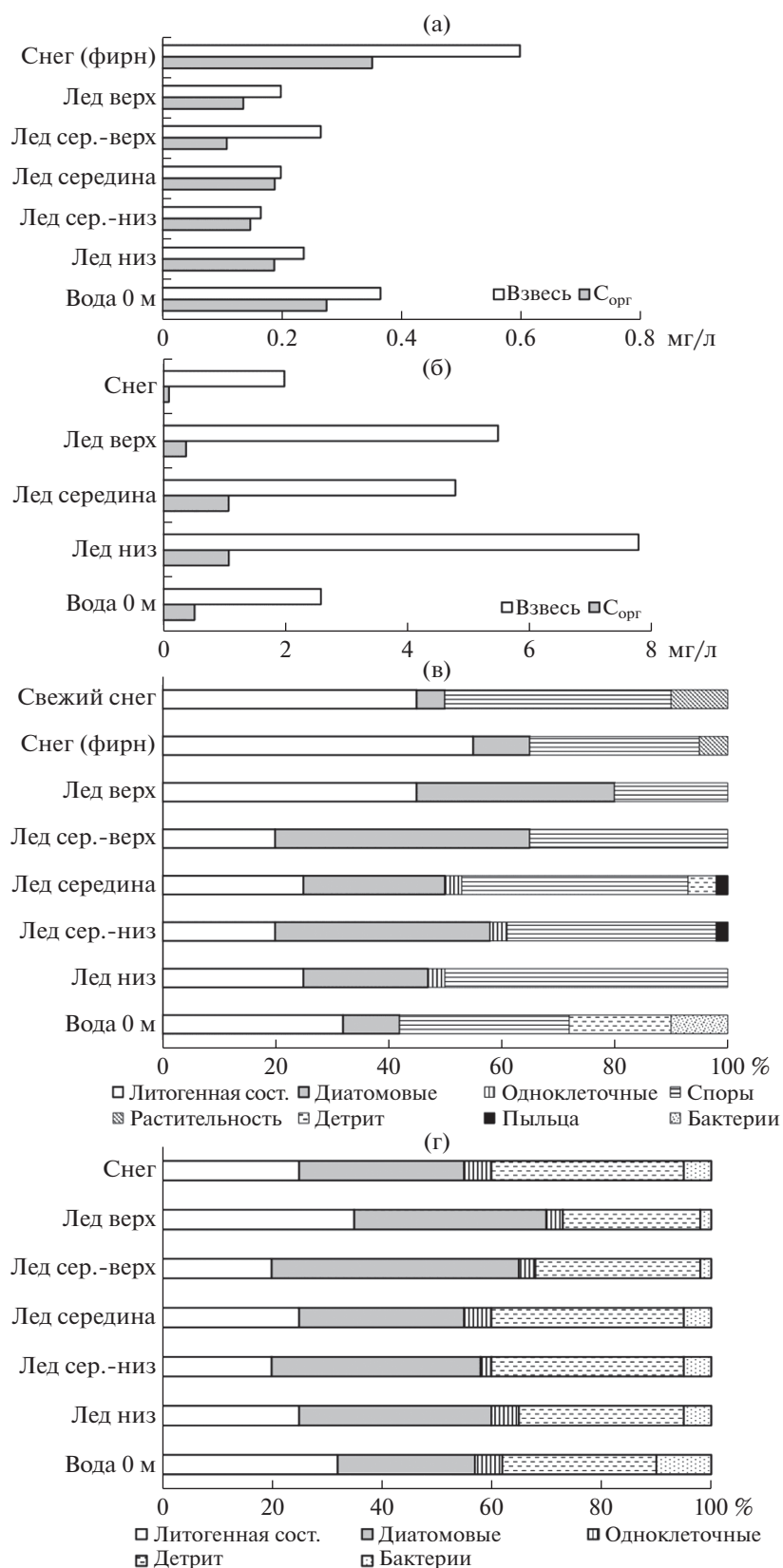
(рис. 2а—2б). Это связано с высокой продуктивностью антарктических вод и, как следствие — более интенсивное заселение планктонных организмов в рыхлой структуре припайного льда. Кроме того, арктический паковый снежно-ледовый покров содержит существенную долю антропогенного углерода, что в антарктическом 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 ( $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ ) и его биогенная составляющая — поток  $C_{\text{орг}}$  ( $\text{мгC/м}^2/\text{сут}$ ), по нашим и литературным данным в Центральной Арктике и Антарктике

| Координаты                   | Дата               | Горизонт, м | Общий поток,<br>$\text{мг/м}^2/\text{сут}$ | Поток $C_{\text{орг}}$ ,<br>$\text{мгC/м}^2/\text{сут}$ | Источник      |
|------------------------------|--------------------|-------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------|
| Центральная Арктика          |                    |             |                                            |                                                         |               |
| 89°37.02' N;<br>08° 37.12' W | 04.2007<br>04.2008 | 20          | 52                                         | 10                                                      | Данная работа |
|                              |                    | 30          | 27                                         | 4.4                                                     |               |
|                              |                    | 70          | 31                                         | 7.8                                                     |               |
| 85°17' N<br>122°32' E        | 09.2012            | 5           | 100                                        | —                                                       | [24]          |
|                              |                    | 25          | 150                                        | 11                                                      |               |
| 81°04.5' N;<br>138°54.0' E   | 04.1995–04.1996    | 150         | 12–196                                     | 5.1                                                     | [19]          |
| Антарктика                   |                    |             |                                            |                                                         |               |
| 66°29.93' S;<br>92°58.19' E  | 04.2001            | 25          | 36                                         | 4.1                                                     | Данная работа |
|                              |                    | 50          | 57                                         | 11                                                      |               |
|                              |                    | 75          | 56                                         | 16                                                      |               |
| 69°12.57' S;<br>76°17.49' E  | 05.2001            | 25          | 34                                         | 3.1                                                     | Данная работа |
|                              |                    | 50          | 29                                         | 1.3                                                     |               |
|                              |                    | 75          | 55                                         | 0.8                                                     |               |
| 68°3.74' S;<br>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  $C_{\text{орг}}$  в Арктике приходится на весенне-летний период. Максимум седиментационных потоков сдвинут относительно пика развития фитопланктона в результате запаздывания развития зоопланктона. Величины потоков  $C_{\text{орг}}$  в арктических морях, измеренные на нижней границе фотического слоя, имеют очень широкий диапазон изменений (от 0.15 до 1200  $\text{мгC/м}^2/\text{сут}$ ). 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  $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ , поток органического углерода 7.4  $\text{мгC/м}^2/\text{сут}$  (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  $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ , поток органического углерода 4.5  $\text{мгC/м}^2/\text{сут}$  [10, 11, 19, 23, 24].

Наши измерения подледных потоков под припайом Антарктики в начале зимнего сезона показывают следующие средние значения: общий поток 43  $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ , поток органического углерода 4.1  $\text{мгC/м}^2/\text{сут}$  (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 Бофорта // 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. Ukraintseva 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<sup>a, #</sup>, A. P. Lisitzin<sup>a</sup>, A. A. Klyuvitkin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>#</sup>*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.