

УДК 551.465

КОНЦЕНТРАЦИЯ, СОСТАВ И ПОТОКИ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В СНЕЖНО-ЛЕДОВОМ ПОКРОВЕ ОКОЛОПОЛЮСНОГО РАЙОНА АРКТИКИ

© 2019 г. А. Н. Новигатский*, А. П. Лисицын

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

**e-mail: novigatsky@ocean.ru*

Поступила в редакцию 30.11.2018 г.

После доработки 15.02.2019 г.

Принята к публикации 05.12.2018 г.

Проведены прямые определения рассеянного осадочного вещества в снежно-ледовом покрове в районе Северного полюса. На максимальном для высоких широт Северного полушария расстоянии от континентов, изучен состав осадочного материала в снежно-ледовом покрове, определены вертикальные потоки вещества из подледного слоя. Эти данные получены с помощью седиментационных ловушек, а для снега и льда — в талых водах большого объема. Оказалось, что в снеге и морских льдах главное значение имеет рассеянное осадочное вещество эолового генезиса.

Ключевые слова: Северный полюс, снежно-ледовый покров, рассеянное осадочное вещество, потоки вещества

DOI: 10.31857/S0030-1574593449–453

Между возникновением осадочного вещества и его накоплением в виде донных осадков существует этап рассеяния до невидимых содержаний и существования в таком рассеянном состоянии во взаимодействии со средой и климатом, биологическими процессами, а затем сгущение до вещества донных осадков с последующим превращением в осадочную породу. Именно этот этап почти не изучался седиментологами. Детальное изучение рассеянных форм осадочного вещества крайне важно, поскольку эти частицы имеют очень большую поверхность, т.е. являются сорбентами, и своим составом и концентрацией отражают все стороны осадочного процесса, т.е. это новый и очень богатый источник информации. Для осадочного процесса в Арктике характерен особый тип седиментогенеза — ледовый морской. Здесь господствуют терригенные осадки, специфичные по способам подготовки осадочного вещества, его транспортировки и отложения. Кроме того, очень сильно рассеяние осадочного вещества в атмосфере, снеге и морских льдах [3, 17, 20].

В настоящей работе нами сделана попытка исследования не конечного продукта процесса седиментации — донных осадков, но всего осадочного процесса, который протекает в основном в скрытой форме в виде ничтожных по размерам частиц, рассеянных в самых незна-

чительных количествах во всех природных геосферах Арктики: атмо-, крио-, гидро-, био- и седиментосферах [5].

В рамках российской федеральной программы по проведению Международного полярного года (МПГ) нами были выполнены исследования снежно-ледового покрова на околополюсной станции Барнео в период с 2007 по 2008 г. Целью работ было изучение литологии и геохимии рассеянного осадочного вещества в снеге, морских дрейфующих льдах, подледной воде и вертикальных подледных потоках осадочного вещества. Для этого в экспедиции проводился отбор проб снежного покрова, ледовых кернов и подледной воды, а также постановка под ледовым покровом седиментационных ловушек [9].

В Арктике по величинам вертикальных потоков осадочного вещества выделяется два пояса высоких значений: первый — маргинальные фильтры рек [1, 2], этот пояс характерен для всех климатических зон. Второй — области таяния однолетних и особенно многолетних морских льдов, этот тип концентрации вещества в потоках характерен только для ледовых зон [10, 11], т.е. является их уникальной особенностью, так же как и самые низкие значения потоков под ледовым покровом (рис. 1). Эти две закономерности типичны для поверхностных слоев водной толщи Арктики [3, 4].

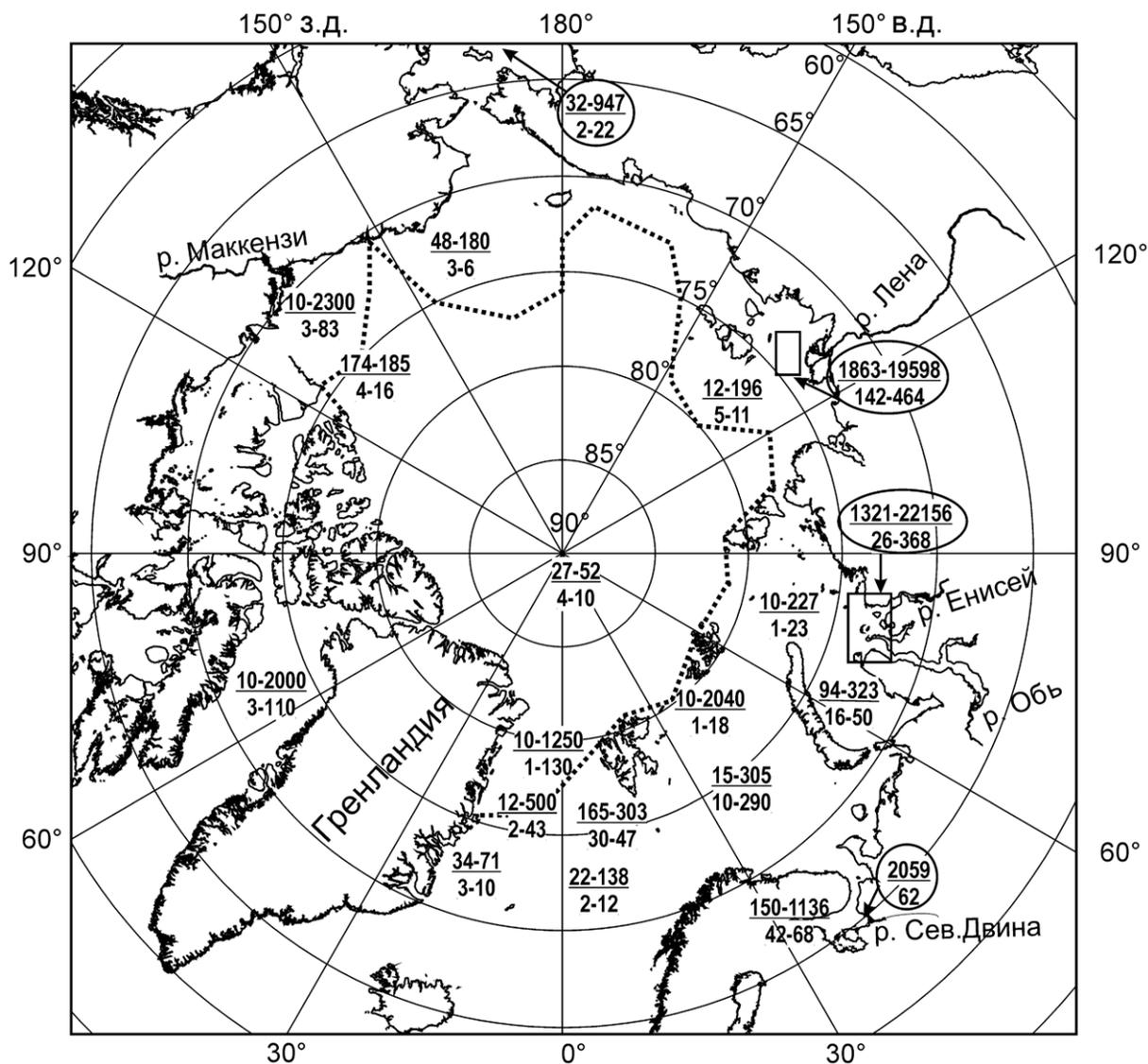


Рис. 1. Схема распределения величин вертикальных потоков осадочного вещества (общий поток в числителе $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ и поток органического углерода в знаменателе $\text{мгC}/\text{м}^2/\text{сут}$) в Арктике и Субарктике по нашим и литературным данным, полученным методом седиментационных ловушек [4].

С этими значениями резко контрастируют пока еще очень редкие данные о потоках под постоянным ледовым покровом: все имеющиеся значения находятся в пределах $1-100 \text{ мг}/\text{м}^2/\text{сут}$ [13, 15]. Это настоящая ледяная пустыня, значение потока соответствует низким, минимальным для Мирового океана содержаниям взвеси под покровом паковых льдов и минимальному развитию планктона. Такие резкие снижения потоков отмечаются и для шельфовых морей Арктики в зимние месяцы [12, 14, 18].

Низкие концентрации рассеянного осадочного вещества характерны для однолетних льдов, образующихся в центральных частях Арктиче-

ского бассейна, многолетний лед аккумулирует более высокие концентрации нерастворимых частиц в своей толще. Формирующийся лед в шельфовых областях, подверженный влиянию речного стока, абразии берегов и взмучиванию донных осадков при штормах, захватывает еще большее количество осадочного материала [16].

В распределении криозолей в толще льда центральной Арктики выделяются две зоны аккумуляции осадочного материала — в кровле ледового поля, где накапливаются нерастворимые частицы, принесенные снегом, и в подошве льда, где новообразованный лед захватывает взвешенное вещество из подледной воды, по-

скольку взвесь является ядрами кристаллизации внутриводного льда (рис. 2а). Также верхние ледовые горизонты содержат более высокие значения органического углерода ($C_{орг}$), чем нижние (рис. 2б), что связано с влиянием снежного по-

крова (эолового материала) и характерно для ледовых массивов Центральной Арктики в зимний период [6].

Используя Al в качестве индикатора литогенного вещества [7], мы определили содержание терригенной компоненты в снежно-ледовом покрове околополюсного района. Для снежно-ледового покрова литогенная составляющая в среднем соответствует 20%, для ледового покрова — 25%. Таким образом, биогенная составляющая преобладает как в снежном покрове (80%), так и в ледовом покрове (75%) (рис. 2в). В воде литогенная составляющая выражена слабее — не более 15%. В подошве льда и подледной воде в большом количестве присутствует аморфный кремнезем, являясь структурообразующим элементом панцирей фитопланктона. Эти соотношения подтверждаются результатами микроскопических исследований.

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

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, их поступление эоловым путем отмечено практически во всех областях Арктики вплоть до Северного полюса [8, 19].

Снежный покров высоких широт Земли является благоприятным коллектором как минеральных частиц, так и частиц биогенного происхождения. Аккумулируясь на поверхности снежного покрова, они хорошо сохраняются и со временем становятся фоссильными. Литогенная составляющая в снежном покрове находится в подчиненном соотношении с биогенной частью и представлена отдельными минеральными зернами.

В верхней части льда, в отличие от остальной ледовой толщи, прослеживается высокое содержание минеральных частиц (до 30%), что связано с влиянием снежного покрова и аккумуляцией вещества на поверхности льда (эоловый источник). В биогенной составляющей преобладают диатомовые водоросли, как и в средней части льда, где диатомовые водоросли и сили-

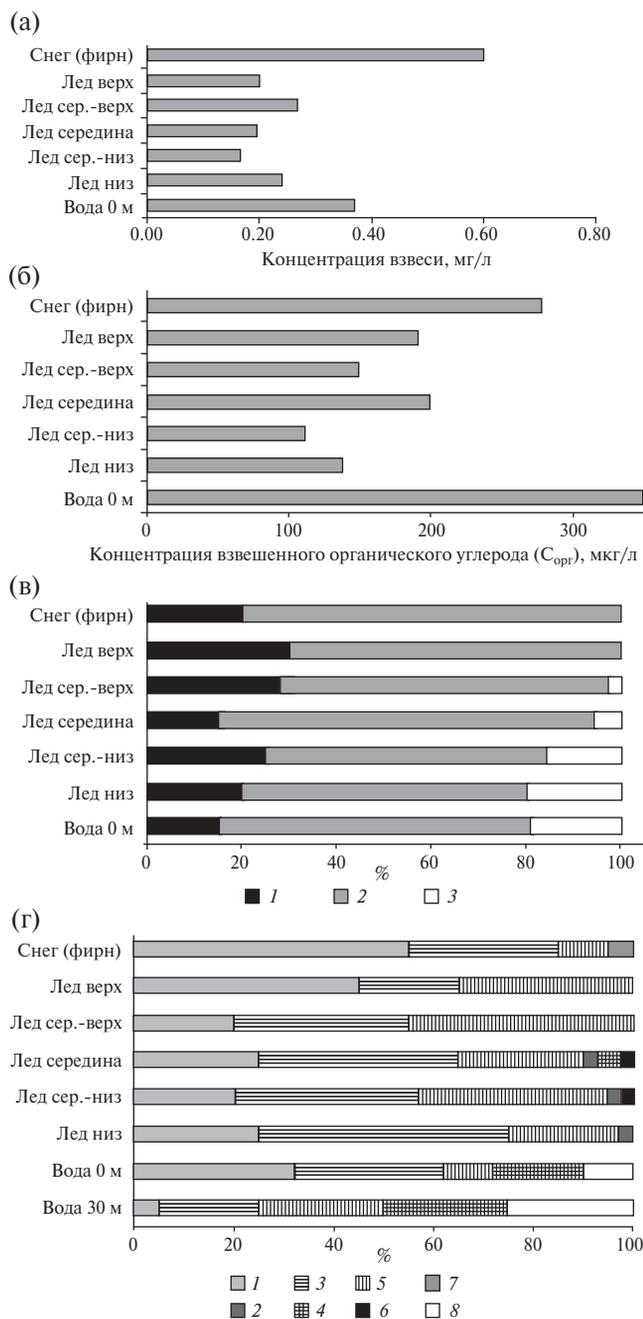


Рис. 2. Распределение в околополюсной системе снег-лед-подледная вода: (а) — концентрации взвешенных частиц, мг/л; (б) — концентрации взвешенного органического углерода, мкг/л; (в) — процентного соотношения: 1 — литогенной составляющей, 2 — органического вещества, 3 — аморфного кремнезема ($SiO_2_{аморф}$); (г) — процентного соотношения вещественного состава: 1 — литогенная составляющая, 2 — остатки высших растений, 3 — споры, 4 — биогенные остатки, 5 — диатомовые, 6 — пыльца, 7 — одноклеточные, 8 — бактерии [5].

кофлагелляты составляют до 50%. Также в средней части льда присутствуют пыльца и одноклеточные животные, это характерно и для нижней части льда (рис. 2г).

В воде литогенная составляющая выражена слабее, нежели в снежно-ледовом покрове, в основном преобладает биогенная часть, наблюдается высокая встречаемость бактериальных ассоциаций и биогенных остатков в виде обломков панцирей и раковин, споры диатомовых и сами диатомовые водоросли (рис. 2г).

Подледные потоки рассеянного осадочного вещества в зимнем сезоне 2007–2008 гг. в среднем составили: общий поток 37 мг/м²/сут, поток органического углерода 7.4 мгС/м²/сут (рис. 1). Эти величины хорошо согласуются с зимними значениями подледных потоков рассеянного осадочного вещества, измеренных в других районах Арктического бассейна. Так, в среднем значения потоков составили: общий поток 50 мг/м²/сут, поток органического углерода 4.5 мгС/м²/сут [12, 13, 16, 18].

Таким образом, максимальные содержания рассеянного осадочного вещества и взвешенного органического углерода в системе снег-лед-подледная вода характерны для подледной воды; повышенные содержания исследуемых компонентов характерны для снежного покрова и кровли ледового покрова, что говорит о существенном вкладе эолового источника осадочного вещества в высоких широтах. В системе снег-лед-подледная вода характерны высокие значения биогенной составляющей (от 65 до 85%), литогенная составляющая характеризуется более низкими значениями (от 15 до 35%) и преобладает в снежном покрове и в кровле ледового покрова, что указывает на эоловый генезис литогенного материала. В составе рассеянного осадочного материала преобладают створки и споры фитопланктона и различные формы органики, минеральные частицы находятся в подчиненном положении. Полученные нами значения подледных потоков рассеянного осадочного материала в околополюсном районе соответствуют значениям, характерным для подледных потоков Арктического бассейна зимнего сезона.

Источник финансирования. Обработка материала выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 14-50-00095; данные по органическому углероду выполнены за счет проекта РФФИ № 19-05-00022. Исследования проведены в рамках государственного задания ФАНО России, тема № 0149-2018-0016, № 0149-2019-0007.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. 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.
3. Лисицын А. П. Новый тип седиментогенеза в Арктике — ледовый морской, новые подходы к исследованию процессов // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51. № 1. С. 18–60.
4. Лисицын А. П., Новигатский А. Н., Ключиткин А. А. и др. Потоки рассеянного осадочного вещества в Белом море, седиментационные обсерватории, новые направления изучения осадочного процесса // *Система Белого моря. Т. 3. Рассеянный осадочный материал гидросферы, микробные процессы и загрязнения*. М.: Научный мир, 2013. С. 200–304.
5. 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.
6. Немировская И. А., Новигатский А. Н. Углеводороды в снежно-ледяном покрове и водах Северного Ледовитого океана // *Геохимия*. 2003. № 6. С. 651–651.
7. Шевченко В. П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М.: Наука, 2006. 231 с.
8. Шевченко В. П., Лисицын А. П., Штайн Р. и др. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // *Проблемы Арктики и Антарктики*. 2007. № 1 (75). С. 106–118.
9. Шевченко В. П., Виноградова А. А., Лисицын А. П. и др. Эоловый и ледовый перенос и потоки вещества (включая экотоксиканты) в Арктике — результаты исследований, выполненных в 2006–2008 гг. // *Итоги работ по программе фундаментальных исследований Президиума РАН П-16, часть 2 / Отв. ред. Котляков В. М. М.: ИГ РАН, 2009. Т. III. Ч. 2. С. 204–215.*
10. Шевченко В. П., Маслов А. В., Лисицын А. П. и др. Систематика Cr, Co и редкоземельных элементов в осадочном материале дрейфующих льдов северной части круговорота Бофорта // *Литосфера*. 2017. Т. 17. № 3. С. 59–70.
11. 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 // *J. of Marine Systems* 2005. V. 56. P. 151–166.
12. Fahl K., Nöthig E.-M. Lithogenic and biogenic particle fluxes on the Lomonosov Ridge (central Arctic Ocean) and their relevance for sediment accumulation: Vertical vs. lateral transport // *Deep-Sea Res. I*. 2007. V. 54. P. 1256–1272.
13. Hargrave B. T., Von Bodungen B., Stoffyn-Egli P., Mudie P. J. Seasonal variability in particle sedimentation under permanent ice cover in the Arctic Ocean // *Continental Shelf Research*. 1994. V. 14. №. 2–3. P. 279–293.
14. Lalonde 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.
15. *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.
16. *Lisitzin A. P.* Sea-ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean: Recent and Past. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. 563 p.
17. *Lisitzin A. P., Shevchenko V. P.* Glacial-marine sedimentation // *Encyclopedia of Marine Geosciences* / Eds. Harff J. et al. Springer, 2016. P. 288–294.
18. *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 Res.* 2006. V. 26. P. 41–81.
19. *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* / Ed. Kallenborn R. Springer, 2016. P. 59–73.
20. *Stein R.* Arctic Ocean sediments: processes, proxies, and paleoenvironment // *Developments in Marine Geology*. Elsevier, 2008. V. 2. 592 p.

CONCENTRATION, COMPOSITION AND FLUXES OF DISPERSED SEDIMENTARY MATTER IN THE SNOW-ICE COVER OF THE NEAR-POLE ARCTIC REGION

© 2019 A. N. Novigatsky*, A. P. Lisitzin

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: novigatsky@ocean.ru*

Received November 30, 2018

Revised version received February 15, 2019

After revision December 05, 2018

Direct determinations of the dispersed sedimentary matter in the snow-ice cover near the North Pole are carried out. The composition of sedimentary material in the snow-ice cover was studied at the maximum for the high latitudes of the Northern Hemisphere distance from the continents, the vertical fluxes of matter from the under-ice layer were determined. These data were obtained using sediment traps. For snow and ice investigations melt waters of large volume were studied. It was found that dispersed sedimentary matter of aeolian genesis is of primary importance in snow and sea ice.

Keywords: North Pole, snow and ice cover, suspended particulate matter, particulate fluxes