

НОВЫЙ ТИП СЕДИМЕНТОГЕНЕЗА В АРКТИКЕ — ЛЕДОВЫЙ МОРСКОЙ, НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ

А.П. Лисицын

Институт океанологии РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия

На протяжении последних 10—20 лет в ходе исследований по осадкообразованию и геохимии Северного Ледовитого океана удалось провести прямое (инситуное) изучение всех видов осадочного вещества, которое в ходе смешения дает донный осадок. Оказалось, что главное значение имеет не осадочный материал рек, как считалось, а рассеянное осадочное вещество (взвесь) атмосферы, криосферы (снег, лед), морской воды, речной воды, биосферы (планктон и бентос) и антропоферы (загрязнения всех видов), к которому близ хр. Гаккеля добавляется эндогенное вещество зоны спрединга. Главное значение при смешении имеет осадочный материал морских льдов, отсюда и тип седиментогенеза — ледовый морской.

С применением новых методов и приборов (в том числе спутников, бесконтактных гидрооптических, гидрофизических и гидроакустических и др.) и инситуных анализов удалось определять содержание, состав и свойства рассеянного осадочного вещества всех видов, его потоки ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{год}$), векторы движения и скорости в разных частях Северного Ледовитого океана, причем непрерывно во времени для интервалов от часов—суток до месяцев, сезонов и десятков лет. Это новый подход к изучению осадочного процесса, который открывает путь к четырехмерной (4-D) количественной седиментологии.

Ледовый седиментогенез, рассеянное осадочное вещество (взвесь), инситуное изучение седиментации, ловушки седиментационные.

MARINE ICE-RAFTING AS A NEW TYPE OF SEDIMENTOGENESIS IN THE ARCTIC AND NOVEL APPROACHES TO STUDYING SEDIMENTARY PROCESSES

A.P. Lisitzin

Research on sedimentogenesis and geochemistry of the Arctic Ocean over the last 10–20 years has allowed direct (*in situ*) studies to be made for all types of sedimentary matter that mix together and form the bottom deposit. Contrary to common knowledge, river sediment turned out to be insignificant; instead, more important is the dispersed sedimentary matter (suspension) from the atmosphere, cryosphere (snow, ice), marine water, riverine water, biosphere (plankton and benthos), and anthroposphere (all types of pollutants), supplemented by the endogenic matter supplied from spreading zone of the Gakkel Ridge. The mixture is dominated by sedimentary material discharged from sea ice; hence, this type of sedimentogenesis is referred to as the ice-rafted marine sedimentogenesis.

Application of new methods and tools (including satellites, remote hydrooptical, hydrophysical, and hydroacoustic survey, etc.) and *in situ* analyses produced measurements of content, composition, and characteristics of all types of dispersed sedimentary matter, its fluxes ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{year}$), vectors of movement, and rates for different segments of the Arctic Ocean; observations were carried out continuously on different time scale, from hours—days to seasons and dozens of years. It is a new approach to the study of sedimentary matter that opens up a new possibility for a 4D quantitative sedimentology.

Ice-rafted sedimentogenesis, dispersed sedimentary matter (suspension), in situ study of sedimentation, sediment traps

ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия в изучении морей и океанов были сделаны крупные открытия, которые оказались важными не только для специалистов-литологов, но и для широкого круга ученых, работающих в области наук о Земле. Именно с изучением геофизики и тектоники, петрографии коренного ложа океана связано появление тектоники литосферных плит. Не менее крупные открытия сделаны в области изучения осадочной оболочки на дне Мирового океана и хода осадочного процесса.

Несмотря на это до настоящего времени многие геологи остаются на позициях 60—70-х годов XX века и считают, что «...в океане геохимический процесс в целом есть прежде всего (на 90—93 %) процесс физический, а еще точнее — механический, т.е. процесс механического разнosa и фракционирования твердых фаз, поступивших с берега, аллохтонных в весьма малой степени (6—9.2 %), этот физический процесс осложнен биогенным» [Страхов, 1976, с. 201; 1993].

Между тем за прошедшие годы изучение океана продвинулось далеко вперед. Только Институт океанологии РАН провел более 300 научно-исследовательских экспедиций на крупных судах — плавучих

институтах с подводными аппаратами, спутниковыми системами и другими современными средствами исследований. Их результаты в кратком виде изложены в десятичной монографии «Океанология» [1977—1980], а также во множестве монографий, статей и атласах [Атлас..., 1977, 1980, 1985]. Крупные исследования с многочисленными открытиями были проведены и за рубежом.

Задача настоящей статьи состоит в том, чтобы показать новые подходы к изучению осадкообразования в Мировом океане и особенно в Северном Ледовитом океане как части планеты (геосферы), находящейся в тесном взаимодействии с другими системами — геосферами. Эти геосферы, как выяснилось, также содержат рассеянное осадочное вещество — маркер для изучения обмена между ними и Мировым океаном веществом и энергией [Лисицын, 2001]. Что нового дали эти исследования, как они соотносятся с постулатами фундаментальной теории? На основе данных современных методов (спутниковые исследования, данные гидрооптики и гидрофизики, изучения взвеси и растворов, биологии и др.) и на примере наименее изученного Северного Ледовитого океана мы постараемся показать, что эти исследования становятся все более актуальными.

Существует ли действительно в природе ледовый морской тип седиментогенеза, а не нормально-осадочный или он действительно ограничен континентами, показать (хотя бы контурно), что в целом дали исследования по осадочным процессам в Северном Ледовитом океане — самой труднодоступной части Мирового океана — для литологии в целом.

Для осадочного процесса в Арктике в соответствии с реальными процессами характерен особый тип седиментогенеза — ледовый морской, который соответствует для суши (отдельные острова в высоких широтах) континентальному седиментогенезу зон холодных полярных пустынь, северной тундры и тайги [Лисицын, 1978, 1994а,б; Lisitzin, 1972, 2002]. 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 (лед и снег), многолетняя мерзлота в водосборе (а также на части шельфа) и минимальное значение биогенных процессов. Верхний деятельный слой моря, где идут процессы фотосинтеза, подготовки первопищи для всех организмов моря, большую часть года или круглогодично (области паковых льдов) перекрыт дрейфующими льдами и снегом, блокирующими фотосинтез. Длительная полярная ночь и малое поступление биогенных элементов с речным стоком [Пивоваров, 2000] в сочетании с самыми низкими температурами для Северного полушария — это важнейшие факторы природной среды Арктики, они также резко снижают ход осадочного процесса.

Эти особенности среды и климата (сочетание слабой освещенности, сурового климата, господства льда и снега) определяют своеобразие не только процессов на континентальных блоках, но и морского седиментогенеза. Во многом они близки к условиям среды и климата Антарктики, но здесь в приполюсном районе расположен континент — крупнейший современный ледниковый купол планеты. Поэтому для ледовой седиментации в Южном полушарии главную роль играет подготовка и поставка в море айсбергового материала (айсберговый тип ледового седиментогенеза) в отличие от Арктики, где седиментогенез определяется морскими льдами (тип ледового седиментогенеза, т.е. связанного не с айсбергами, а с морским льдом) [Lisitzin, 2002].

Во время позднекайнозойских оледенений ледовый морской седиментогенез Арктики, как показывает прямое изучение длинных колонок донных осадков и кернов бурения, дополнялся в прошлом айсберговым, связанным с развитием оледенения Скандинавии и Северной Америки, а также высокоширотных островов. В настоящее время айсберги в Арктике очень редки и связаны с распадом остатков ледников Гренландии и Канадского архипелага.

Важный шаг вперед в понимании осадочного процесса удалось сделать путем изучения не только донных осадков, что делалось много лет [Boggild, 1906; Белов, Лапина, 1961; Boström, Thiede, 1984; Лисицын, 1994а; Gurevich, 1995; Land-ocean systems..., 1999; Кошелева, Яшин, 1999; Lisitzin, 2002; Edwards, Coakley, 2004; Левитан и др., 2007; Stein, 2008; Система..., 2009], но также прямого инситу изучения осадочного вещества, заключенного в морских льдах и айсбергах, снеге, атмосфере, речной и морской воде, в биогенном осадочном веществе, вулканогенном веществе наземных и подводных (подводные гидротермы) вулканов, т.е. удалось реализовать возможность сравнительного изучения как осадочного вещества в виде рассеянных его форм (взвесь), так и в концентрированном — в виде донных осадков. Возникла возможность впервые увидеть и проанализировать осадочный процесс во всех его составных частях и на всех этапах — от возникновения и транспортировки из разных источников, через этап осаждения в водной толще и до формирования донного осадка из всех этих рассеянных форм.

Такое исследование по единой программе и едиными методами проводилось автором и его сотрудниками на протяжении 50 лет с охватом всего Мирового океана [Лисицын, 1955, 1956, 1959, 1966, 1974, 2001а,б; Lisitzin, 1972], т.е. изучался материал для сравнительной литологии этих рассеянных форм вещества и концентрированных их форм (донных осадков) для всех климатических, глубинных и тектонических зон океана. Сделана попытка исследования не только конечных продуктов процесса — донных

осадков, но и всего осадочного процесса, который протекает в основном в скрытой форме в виде ничтожных по размерам частиц, рассеянных в самых незначительных количествах во всех природных геосферах: атмосфере, криосфере Земли, гидро- и биосфере, седиментосфере и в глубинных сферах Земли. Обычно это микро- и наночастицы, медленно накапливающиеся в донных осадках морей, океанов, а также водоемов суши (водосборов) в пределах тех же природных зон. Работы по изучению осадочных процессов в полярных океанах заняли около 20 лет.

В самом южном из морей Северного Ледовитого океана — Белом, нам удалось провести уникальное, непрерывное по времени (десять лет), системное исследование таких рассеянных и концентрированных форм осадочного вещества не только новыми приборами и методами, но, что важно, впервые на количественном уровне, причем инситу и непрерывно во времени, т.е. начать количественные четырехмерные (4-D) исследования осадочного процесса — как процесса взаимодействия рассеянных форм осадочного вещества в ходе формирования донных осадков в полярных условиях [Лисицын, 2001б, 2003]. Условия осадкообразования в Белом море близки к условиям Центральной Арктики: температура придонных вод в этом море круглый год около $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, а поверхность моря большую часть года покрыта дрейфующими льдами, зима продолжается полгода [Белое море..., 1995, 2007; White Sea..., 2005; Бергер, 2007].

Детальное изучение рассеянных форм осадочного вещества особенно важно потому, что эти частицы имеют очень большую поверхность, т.е. являются сорбентами. Они своим составом (химическим, минеральным, изотопным) и концентрацией отражают все стороны осадочного процесса, т.е. это новый и очень богатый источник информации для понимания процессов.

Действительно ли океан под воздействием течений гомогенизирован — и это маловероятное явление, противоречащее всем имеющимся данным, может быть положено в основу фундаментальной, глобальной теории литогенеза? В ошибочности этого положения Н.М. Страхова убеждает весь материал, накопленный за последние десятилетия, — данные по физике, химии, биологии и морской геологии, полученные из всех частей Мирового океана, со всех его глубин вплоть до максимальных, т.е. во всем многообразии условий среды и климата, которые возможны на нашей планете.

Уже давно удалось установить основные закономерности, определяющие зональность этой природной среды морей и океанов, что рассмотрено в ряде статей и монографий [Богоров, 1959, 1971; Безруков, 1962а,б; Зенкевич, 1963, 1970, 1977; Богоров и Зенкевич, 1966; Богоров и др., 1968; Лисицын и др., 1974, 1978, 1988; Виноградов и Лисицын, 1981; Лисицын и Виноградов, 1982]. Распределение организмов (а следовательно, и биогенная седиментация) океана подчинены трем законам биологической структуры океана (закон Богорова—Зенкевича), т.е. климатической, вертикальной и циркумконтинентальной зональностям. Сходные законы установлены также для физики и химии морей и океанов. Наконец, общие закономерности осадочных процессов определяются четырьмя законами Безрукова—Лисицына — климатическая, вертикальная, циркумконтинентальная и тектоническая зональности.

Таким образом, одним из главных выводов из всех данных океанологии является не подтверждение концепции «геомогенизированного океана», а наоборот, установление многообразия, которое объясняется основными закономерностями природы Мирового океана, которые простираются (с понятными отличиями) и на континенты в соответствии с общей географической зональностью природы планеты.

Полностью подтвердились слова В.В. Докучаева [1899], сформулировавшего в общем виде закон географической зональности: «Благодаря шарообразности Земли и ее вращению вокруг оси, известному положению относительно Солнца, весь земной шар распадается на известные пояса — экваториальный, тропический, умеренный и полярный. Соответственно этим зональным, широтным поясам климата растительность и животный мир, а отчасти и минеральное царство (по крайней мере в своих поверхностных образованиях) по направлению от экватора к Северному и Южному поясам изменяются в строго определенном порядке».

Далее В.В. Докучаев подчеркивал, что та же зональность и тот же всемогущий закон природы резко выражен в морях, в океанах и в реках. Учение о зональности распределения жизни в океане, как подчеркивает один из его создателей — академик Л.А. Зенкевич, является по-существу «морской частью докучаевского учения о географической зональности» [Зенкевич, 1977, с. 81].

Эти общие законы справедливы и для донных осадков [Климатическая зональность..., 1991; Лисицын, 1991; Гершанович, Котенев, 1991; и др.], однако они недостаточны для выяснения сути самих процессов образования осадков, т.е. превращения рассеянного осадочного вещества в донные осадки, от момента его возникновения в корях выветривания, в ходе рассеяния осадочного вещества во всех геосферах, когда оно разбавляется и как бы «исчезает» в атмосфере, в морских и речных водах во взаимодействии с морским льдом, снегом или биотой. Ведь содержание его в среднем для вод Мирового океана (по нашим определениям) оказалось всего 0.0001 г/л , а в водах рек Сибири $0.03\text{—}0.04\text{ г/л}$, т.е. такие количества невидимы и неощутимы без применения специальных приборов. Еще сильнее рассеяние осадочного вещества в атмосфере, а также в морских льдах, наземных ледниках, айсбергах и снеге. Стало очевид-

ным, что 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 последующими превращениями в осадочную породу. Именно этот этап почти не изучался седиментологами. Что же дали нам многолетние исследования?

НОВЫЙ ПОДХОД К ИЗУЧЕНИЮ ОСАДОЧНОГО ПРОЦЕССА — ИНСИТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАССЕЯННЫХ ФОРМ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА ВО ВНЕШНИХ ГЕОСФЕРАХ И ИХ КОНЦЕНТРАЦИЯ В ВИДЕ ДОННЫХ ОСАДКОВ

Осадочное вещество в рассеянной форме называют взвесью (микро- и наночастицами). Последнее определение подчеркивает, что в рассеянном веществе преобладают тонкие частицы, что предопределяет их подвижность, значительную площадь поверхности, сорбционные и другие свойства, а в значительной мере также вещественный состав, дальность распространения в разных средах и возможность «пересадочного распространения» при обычном в природе переходе частиц из одной среды в другую (например из речной воды в морскую, из атмосферы в воду или лед и др.).

Тонкость частиц определяет также и время их нахождения в среде перед отложением в форме донных осадков, т.е. для морской среды — время опускания на глубину океана, время реакции частица—вода, нахождения в динамическом поле океана, воздействия организмов и др.

Основное внимание геологов-осадочников долгие годы было направлено на изучение процессов дифференциации осадочного вещества в корях выветривания, биологических процессов, а не на изучение его дальнейшего рассеяния и смешения взвеси (рассеянных частиц) из разных источников (и даже из разных геосфер) в ходе их осаждения в толще морской воды, т.е. в условиях стратифицированного, «живого» и динамичного (а не гомогенизированного) океана [Виноградов, Лисицын, 1981; Лисицын, Виноградов, 1982; Виноградов, 2008].

Такое исследование возможно только для современных осадочных процессов, оно требовало изучения ничтожных (микро- и наночастиц) количеств вещества, извлеченного из морской воды, его состава и свойств на пробах, полученных в разных климатических зонах (в том числе и ледовой), с разных глубин и расстояний от континентов, в разных тектонических обстановках. Литолог, изучающий древние породы, лишен возможности такого исследования и для своих реконструкций должен иметь надежные данные о современных процессах.

Изучение осадочных «невидимок» — водной взвеси в морях и океанах — было начато автором этих строк впервые в мире в 1951—1953 гг., а в 1955—1956 гг. появились первые публикации о результатах [Лисицын, 1955, 1956; Лизунов, Лисицын, 1955]. Удалось с применением наиболее чувствительных методов и приборов того времени (на грани возможностей методов) не только извлекать рассеянные формы осадочного вещества из морской воды с разных глубин, но и обеспечить достаточные его количества для аналитических определений состава и свойств, реализовать эти новые возможности в многочисленных рейсах во всех океанах, во всех климатических, в том числе ледовых, зонах.

Впервые удалось составить сначала схемы вертикальных (до дна) разрезов, а потом карты количественного содержания рассеянного осадочного вещества по разным глубинным слоям воды, его минерального и химического составов, свойств, состава биогенных остатков. Изучение рассеянного вещества морской воды постепенно стало таким же обязательным, как изучение его форм, сконцентрированных за длительное время на морском дне, — донных осадков [Лисицын, 1974, 1978].

Этим, однако, не закончились исследования невидимых форм осадочного вещества: стало очевидно, что необходимо столь же пристальное изучение невидимого осадочного вещества, поступающего из рек и рассеивающегося при впадении в море. За эти же годы автором вместе с сотрудниками были проведены многочисленные речные экспедиции и предустьевые исследования практически для всех крупнейших рек мира и для всех климатических зон, в том числе ледовых, и разных тектонических обстановок [Гурвич, 1972; Лисицын, Гордеев, 1974, 2003; Гордеев, Лисицын, 1978, 2005; Чудаева, 1981, 2002; Гордеев, 1983, 2004, 2009]. Стали выявляться закономерности количественного распространения, состава и свойств, а также маркеры для рассеянного речного материала всех природных зон (включая ледовую), его изменений на границе река—море [Лисицын, 1994б; Гордеев, 2009].

Многие годы считалось, что эоловый материал имеет существенное значение только в аридных зонах суши и что главное значение здесь имеют эвапориты, а в ходе рассеяния — пески. Прямые исследования количественного распределения, состава и свойств эолового вещества в воздухе из всех климатических зон показали, что и для этого типа рассеянного осадочного вещества не пески, а тонкие алевриты и пелиты для дальнего переноса имеют главное значение. Большую роль в составе аэрозолей играет также биогенный материал (до 30—50 %), а также минералы-маркеры аридных зон. Открылись новые механизмы дальнего и сверхдальнего (глобального) распространения этого вида рассеянного осадочного

вещества, а также разные высотные уровни его переноса. Отложение идет по путям воздушных потоков таким образом, что аридные зоны континентов, по прямым наблюдениям, продолжают в океан в виде аридных зон океанских вод, взвесей и донных осадков. Это подтверждается во многих рейсах, но особенно вблизи аридных зон как материалами-маркерами, так и особенностями геохимии, биологическими остатками, глинистыми минералами [Лисицын, 1978].

Особенно убедительные данные получены при проведении наземных ядерных взрывов, когда значительное количество осколочных элементов-маркеров выбрасывается в верхнюю атмосферу [Сапожников и др., 2003]. При природных вулканических взрывах также прослеживаются трассы природных маркеров — вулканических пеплов — в атмосфере на многие тысячи километров. На региональном и локальном уровнях — трассирование ведется по различным антропогенным загрязнениям-маркерам.

Золотые процессы переноса рассеянного вещества в нижних слоях атмосферы дополняются еще процессами в верхней атмосфере от уровня струйных течений до уровня новообразования природных маркеров-изотопов в верхней ее части (^{14}C , ^7Be , ^{32}Si , ^{26}Al и др.). Этот разнообразный рассеянный осадочный материал атмосферы удалось изучить во всех зонах океана: в морской воде, на поверхности морских льдов, снега, с континентальных и морских (шельфовых) ледников. Стали понятными параметры рассеянного золотого осадочного процесса и маркеры, количественное распределение, состав и свойства, основные потоки [Лисицын, 1978; Duce et al., 1991].

Наконец, еще один мир рассеянного осадочного вещества связан с водой в твердой ее форме, т.е. со льдами, которые типичны для полярных и холодных частей океанов и континентов. Как и при исследовании золотого рассеянного осадочного вещества, нам пришлось разработать специальные приборы и методы для получения достаточных количеств криозолей. Работы были начаты автором этих строк в первых советских антарктических экспедициях (I—III рейсы дизель-электрохода «Обь» в 1955—1960 гг. в Антарктику), а затем в ряде последующих экспедиций не только в Антарктику, но и в Арктику. Работы в Арктике продолжались более 10 лет и включали не только многочисленные экспедиции, но также наземное изучение криозольного материала снега.

Таким образом, открылись миры невидимого рассеянного осадочного вещества разного генезиса и в разных дисперсных средах, развивающиеся по своим законам. Каждый из этих миров имеет свои особенности дисперсной среды и дисперсных фаз, разную зависимость от условий среды и климата. Открытие этих миров и постижение процессов, проходящих в каждом из них, к сожалению, пока мало отразилось на работах литологов, поскольку значительно проще было использовать универсальную концепцию «гомогенного океана», пусть даже ошибочную.

Сложность мира рассеянного осадочного вещества состоит и в том, что все его виды обычно не существуют раздельно, а взаимодействуют в ходе природных процессов как в пространстве, так и во времени, и потому для седиментолога необходимо было выяснить их реальные вклады, причем не только на качественном, но и на количественном уровне, во времени и в пространстве, с учетом скорости и направления (векторов), т.е. в динамике.

Принятые в литологии и геохимии для количественных оценок единицы содержания (%), а также концентрации (мг/л) не характеризуют динамику процессов, скорость их протекания. Поэтому была применена новая единица: поток вещества (мг/м²/сут или г/м²/год). Появилась возможность перейти к единицам, характеризующим количество вещества во времени, которые литологи используют при изучении донных осадков и осадочных пород (абсолютные массы г/см²/1000 лет), а также к принятым в физике океана потокам морских вод (их абсолютным массам) в единицах Свердруп (Св), что соответствует млн/м³/с.

Таким образом, возникла возможность судить о динамике осадочного вещества, а зная его состав по разным компонентам, — о динамике (потоках) этих компонентов во всех природных геосферах, векторах их движения.

Только сейчас обозначились контуры этого нового понимания седиментологии как науки о рассеянных осадочных «невидимых» формах вещества, собирающих информацию о среде и климате, и их превращении в концентрированные формы — донные осадки и осадочные породы. Осадочный процесс — это динамический процесс, который в природе характеризуется не только дифференциацией, но и смешением в определенных пропорциях разных видов рассеянного вещества в динамическом и геохимическом поле, а также размерами вкладов (в содержаниях (мг/л), концентрациях (%)) и потоках (мг/м²/год) разных видов рассеянного вещества. При изучении современного осадконакопления потоки рассеянного материала, как будет показано, реально (инситу) различаются не только количеством и составом, но и определенными векторами движения (поскольку не всегда поток взвеси направлен вертикально вниз, широко распространены горизонтальные и наклонные потоки). Удастся современными методами изучать также изменение этого вектора во времени, определять градиенты и др. Итак, открылась возможность видеть и измерять, анализировать инситу и во времени, и на этой основе выяснять главные особенности современного осадкообразования. Таким образом, по единой программе, с единым методи-

ческим подходом удалось провести реальное (а не теоретическое) инситуное и количественное изучение современных осадочных процессов.

Эти новые подходы показаны нами для всей области ледового седиментогенеза — Арктики.

СПЕЦИФИКА СРЕДЫ И КЛИМАТА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА И ЕГО ВОДОСБОРА В СОПОСТАВЛЕНИИ С ДРУГИМИ ОКЕАНАМИ

Среди океанов планеты Северный Ледовитый океан (СЛО) занимает особое место (рис. 1). Главные его особенности следующие:

1. Это самый малый из океанов, его площадь составляет 9541 тыс. км², т.е. в 13 раз меньше Тихого океана. Это вместе с тем и самый мелководный океан. Главная его площадь занята шельфом — 52.7 %, т.е. этот океан можно было бы называть шельфовым.

2. В отличие от других океанов, простирающихся через все климатические зоны планеты, главная часть СЛО располагается в одной северной ледовой зоне и занимает крайнюю северную часть планеты, включая Северный полюс. Положение океана в высоких широтах определяет особый режим освещенности с явлением полярной ночи и полярного дня, низким углом нахождения Солнца над горизонтом, постоянным (круглогодичным) ледовым покровом (паковые льды) или временного (однолетние льды), аналогов которому нет в Южном полушарии, где изредка встречаются только двухлетние морские льды. Здесь самый суровый климат в Северном полушарии: минимальная температура в водосборе океана (в р-не Оймякона) -71°C .

3. Ледовый покров океана дополняется континентальным оледенением Гренландии и Канадской Арктики, а также горным оледенением многих островов. Водосбор в значительной части скован много-



Рис. 1. Северный Ледовитый океан, его главные части, моря и крупнейшие реки водосбора.

Границы водосбора — черная сплошная линия, пунктирная линия — крайняя граница распространения льдов.

летней мерзлотой, верхний деятельный слой почвы составляет всего 0.3—0.5 м, а мощность слоя мерзлоты достигает 600 и даже 1000 м, что приводит к слабому развитию выветривания. Здесь нет мощных кор выветривания, поставляющих значительные количества осадочного материала в реки, этим, а также растительностью, предопределяется малая мутность рек в сравнении со средней мировой. Мерзлота вывlena и под толщей донных осадков шельфа.

4. Главную часть года вода (один из важнейших реагентов преобразований горных пород и перемещения осадочного вещества) находится в твердом виде, т.е. в виде льда и снега. Также в виде снега выпадают атмосферные осадки, а главная часть рек имеет снеговое питание и освобождается от льда всего на 3—4 мес. Снеговое питание рек составляет 50—80 %. Характерны очень резкие сезонные изменения транспортировки.

5. Кроме паковых (круглогодичных) льдов, на поверхности океана широким распространением пользуются однолетние льды, а у берегов — также припайные. Ежегодно при замерзании всех этих разновидностей льдов (т.е. в ходе холодной дистилляции) идет отжим тяжелых рассолов (морские льды пресные). При этом на большой площади океана возникает поток тяжелых жидкостей (утяжеленных рассолами) вниз из поверхностного слоя замерзания. Тяжелые воды заполняют понижения рельефа и стекают с края шельфа на склон — возникает явление каскадинга, имеющее важное значение для переноса осадочного материала с шельфа на глубины [Ivanov et al., 2004].

6. Как видно из рис. 1, водосбор СЛО очень велик по площади (отношение площадь водоема/площадь водосбора — наибольшее среди океанов Земли), однако главная водосборная часть приходится на зону тундры и северной тайги с многолетней мерзлотой. Речной сток очень велик 2932 км³ (с территории России) и составляет около 10 % от мирового, что приводит к распреснению обширных площадей полярных морей.

Западная часть водосбора Российской Арктики — равнинная с многочисленными болотами и мелкими озерами, которые задерживают значительную часть осадочного вещества. Высокая заболоченность приводит к возникновению вод, обогащенных растворенной органикой и имеющих темный цвет («кофейные реки»), что снижает мощность слоя фотосинтеза, т.е. ограничивает развитие морских и речных организмов, фитопланктона и фитобентоса.

Все крупные реки Арктики протекают в направлении юг—север (см. рис. 1). Половодье в южных их частях начинается, когда нижние покрыты льдом. Это приводит к взламыванию льдов, образованию ледяных плотин и наводнений в средней и нижней частях рек с подъемом уровня до 20, а в отдельных местах и до 30 м. При прорыве ледовых плотин происходит залповый выброс вод и большого количества осадочного вещества, в том числе песка и грубообломочного материала. Это отмечается при изучении осадков и особенно при бурении скважин в маргинальных фильтрах. Такие наводнения и залповые выбросы повторяются ежегодно, но катастрофических масштабов достигают раз в несколько лет и даже десятков лет. Это одна из важных особенностей ледовых зон.

7. Условия среды и климата этого океана, представляющего, по сути, приполярное средиземное море, соединяющееся с Мировым океаном через два узких пролива (проливы Фрама и Берингов), во многом определяются влиянием Атлантического и Тихого океанов. Теплые воды Атлантики и западный атмосферный перенос (из Европы на восток) приводят к тому, что условия Западной Арктики значительно мягче, чем Восточной. Это можно видеть не только по метеоданным, но также по распределению льдов на поверхности морей (в западной части Баренцева моря зимой льды практически не встречаются), флоры и фауны. Потепление последнего десятилетия привело к сокращению площади льдов только в восточной части. Теплые воды Тихого океана, проникающие через Берингов пролив, также влияют не только на ледовую обстановку и богатство флоры и фауны, но и на осадкообразование — здесь встречаются уникальные для Арктики осадки, обогащенные диатомовыми водорослями.

8. В тектоническом отношении дно океана делится областью спрединга (подводный хр. Гаккеля) на две части. Имеются данные об очень малых скоростях спрединга. Первые исследования с помощью необитаемых подводных аппаратов, а также гидрофизического зондирования показали, что хр. Гаккеля активен, «черные дымы» над его подводными вулканами и гидротермами [Edwards et al., 2001] поднимаются на 500—1000 м. Более полные исследования этого уникального хребта — дело ближайшего будущего.

Окраины океана пассивные и трансформные, активных окраин и зон субдукции не обнаружено. По данным сейсмоки, в осадочной толще часто наблюдаются разломы и несогласия [Хаин, 2001; Хаин, Лиманов, 2004].

9. Таким образом, по приведенным и иным особенностям Северный Ледовитый океан и его водосбор — явления для нашей планеты уникальные. В Южном полушарии высокие широты занимает материк Антарктида, покрытый многокилометровой толщей ледников. По периферии ледники стекают в океан и далее отрываются от массива в виде айсбергов, часто очень крупных размеров. И здесь также господствуют льды, вода в твердом виде, но тип седиментации иной — айсберговый [Lisitzin, 2002]. Северный Ледовитый океан, а также прилежащие к нему области Субарктики (Берингово и Охотское

моря) — это единственная на Земле современная область ледовой седиментации, связанная с развитием морских льдов, такие условия неоднократно возникали в геологическом прошлом и для их понимания необходимо изучение процессов в современной области морской ледовой седиментации.

Важнейшее значение для реконструкции истории природы Северного полушария и ледовой седиментации в конце четвертичного времени имеет бурение скважин на ледниках Гренландии и арктических островов.

В пределах водосбора Российской Арктики важное значение имело также бурение ряда сверхглубоких скважин (до 10—13 км) в водосборе и многолетние геологические и геофизические исследования (в том числе и с применением глубинных ядерных взрывов).

В целом все это обеспечило новое понимание как современных процессов, так и геологической истории Арктики и создает новую основу для освоения ее минеральных ресурсов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В АРКТИКЕ: СПУТНИКОВАЯ СЕДИМЕНТОЛОГИЯ, БЕСКОНТАКТНЫЕ (ГИДРООПТИКА, АКУСТИКА) И КОНТАКТНЫЕ МЕТОДЫ, ВЕРИФИКАЦИЯ И АЛГОРИТМЫ

Использованы материалы экспедиций, проведенных в Арктике в послевоенные годы, в особенности данные последних лет, полученные по международным проектам «SPASIBA», «ЛЮИДЗ» русско-германскими экспедициями, которые проводятся на протяжении последних пятнадцати лет русско-германской лабораторией им. О. Шмидта, экспедициями ААНИИ и Института океанологии РАН, ММБИ, ВНИИОкеангеологии, «Севморгео» и др., а также некоторые результаты глубоководного бурения, бурения ледников Гренландии и данные Международного полярного года. Одно перечисление основных экспедиций и работ отдельных отрядов и партий заняло бы много страниц (рис. 2) [Land-ocean systems..., 1999; The organic carbon..., 2004].

В большинстве отечественных рейсов участвовали зарубежные ученые, что обеспечивало интеркалибрацию методов и сопоставимость результатов.

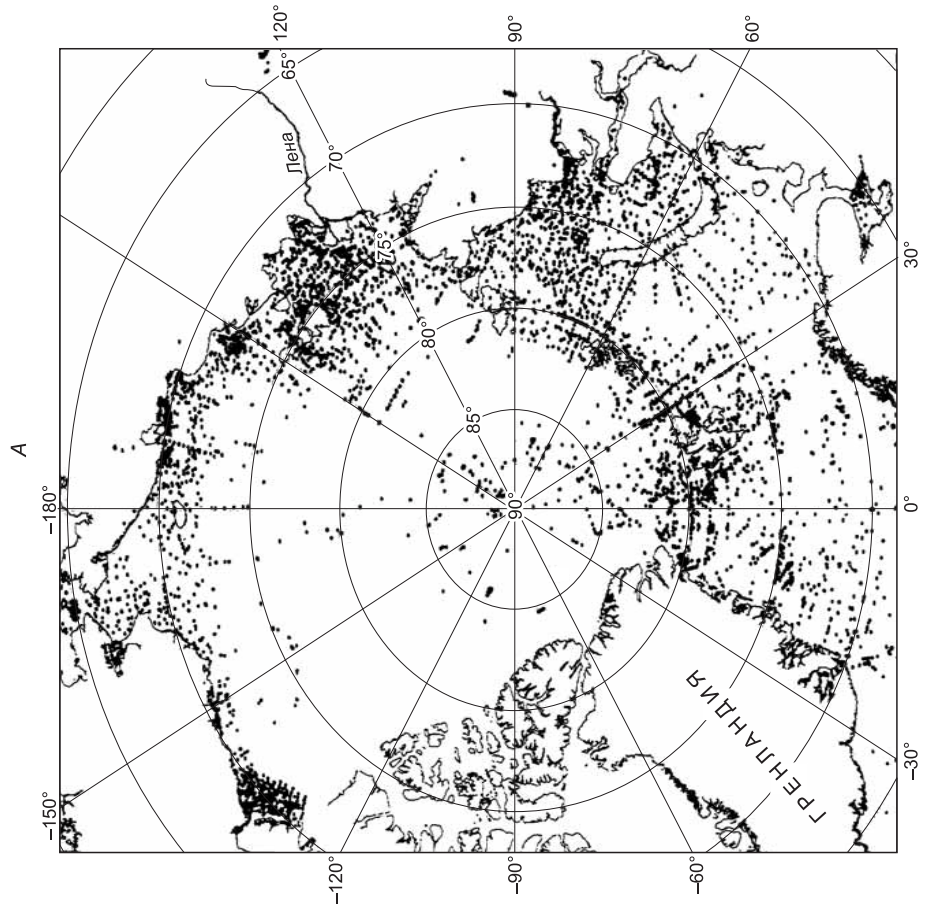
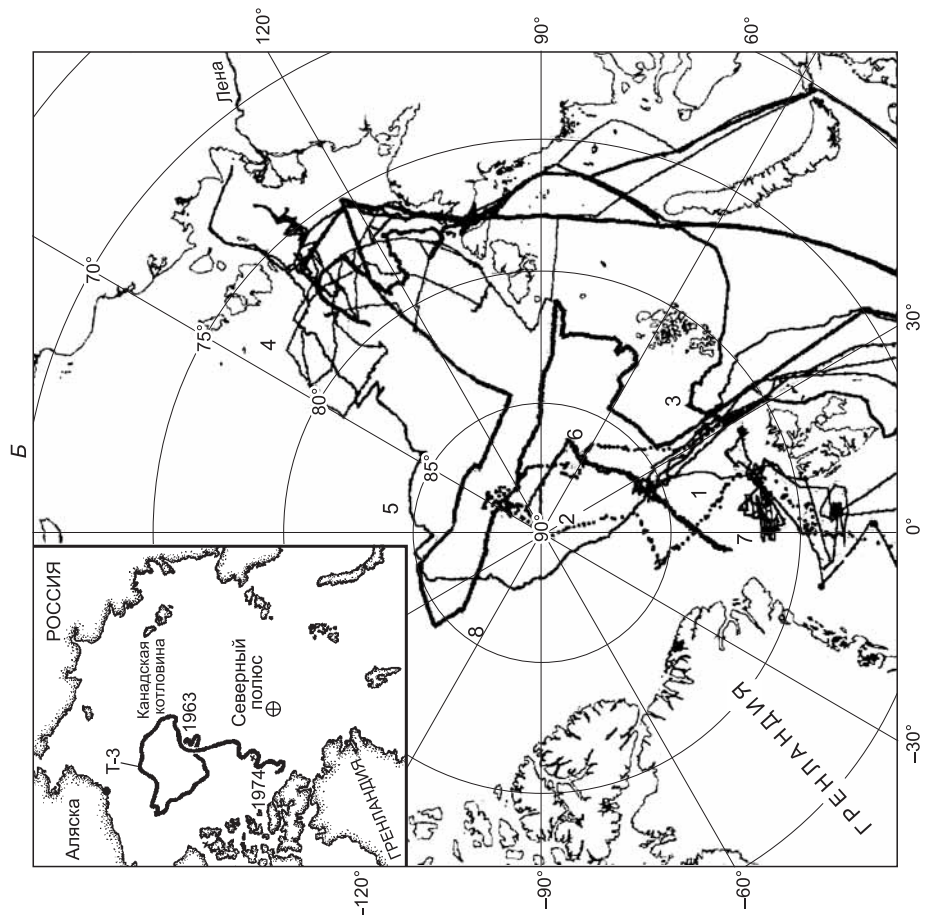
Новый подход, развитый в экспедициях Института океанологии, — это сочетание детальных (полигонные) многолетних (10 лет и более) исследований процессов в одном из морей Северного Ледовитого океана (Белое море) с экспедиционными исследованиями в морях и на суше (реки), с многолетними спутниковыми данными, установкой круглогодичных притопленных платформ с автономными приборами для инситу исследований в разных частях СЛО, изучение потоков и состава рассеянного осадочного вещества во всех геосферах (атмо-, гидро-, крио-, био-, седиментосфера и эндосфера — гидротермы на дне).

Обширные многолетние геофизические исследования проведены Севморгео, Полярной экспедицией, в рейсах судов РАН. Проводились и комплексные океанологические рейсы экспедиционных судов «Дмитрий Менделеев», «Профессор Штокман», «Академик Мстислав Келдыш», «Академик Федоров», «Капитан Драницын», «Яков Смирницкий», «Борис Петров», работы на дрейфующих станциях Северный полюс. Многолетние наблюдения выполнены на островах (о. Шпицберген, о. Врангеля, Соловецкие о-ва и др.). Проведено также несколько экспедиций для кросс-корреляции процессов в морях и в водосборе с изучением разрезов болот, озер, речных отложений, анализом растительности и др. На Соловецких островах, в Архангельске, на Картеже и на нескольких станциях Гидрометеослужбы проводилось стационарное (круглогодичное) изучение потоков рассеянного осадочного вещества и загрязнений.

Результаты планируется опубликовать в многотомной монографии «Система Белого моря» и в ряде отдельных монографий и статей.

Впервые нам удалось провести прямые (инситу) исследования не только количества, но и состава микро- и наноколичеств осадочного вещества во всех природных геосферах Арктики (атмосфера, гидросфера, криосфера, биосфера, седиментосфера, антропосфера — загрязнения, эндосфера), причем в их взаимодействии как в пространстве, так и непрерывно во времени, т.е. исследования в 4-D системе с применением новых методов и приборов [Лисицын, 2003].

Особое значение имело внедрение в практику седиментологических и геохимических исследований спутниковых методов (рис. 3, 4), обеспечивающих непрерывное получение ряда важных параметров для верхнего «спутникового» слоя вод — непрерывно с частотой прохождения спутников круглый год около 2 сут (спутники SeaWiFS, Modis и др.) [Буренков и др., 2000; Лисицын и др., 2003; Бондур, 2004; Копелевич и др., 2004]. Спутники цвета дают возможность определять достаточно точно, а для больших площадей практически одновременно (вплоть для Мирового океана в целом) данные о содержании: 1) рассеянного осадочного вещества (взвеси), 2) содержании хлорофилла, т.е. о первичной продукции фитопланктона, определяющего формирование биогенной части взвеси и ход биогеохимических процессов. Хлорофилл — маркер первопищи океана, т.е. пищевой ценности взвеси в форме живых клеток и микродетрита с примесью минеральной части. Это делает водную взвесь предметом охоты водных организмов.



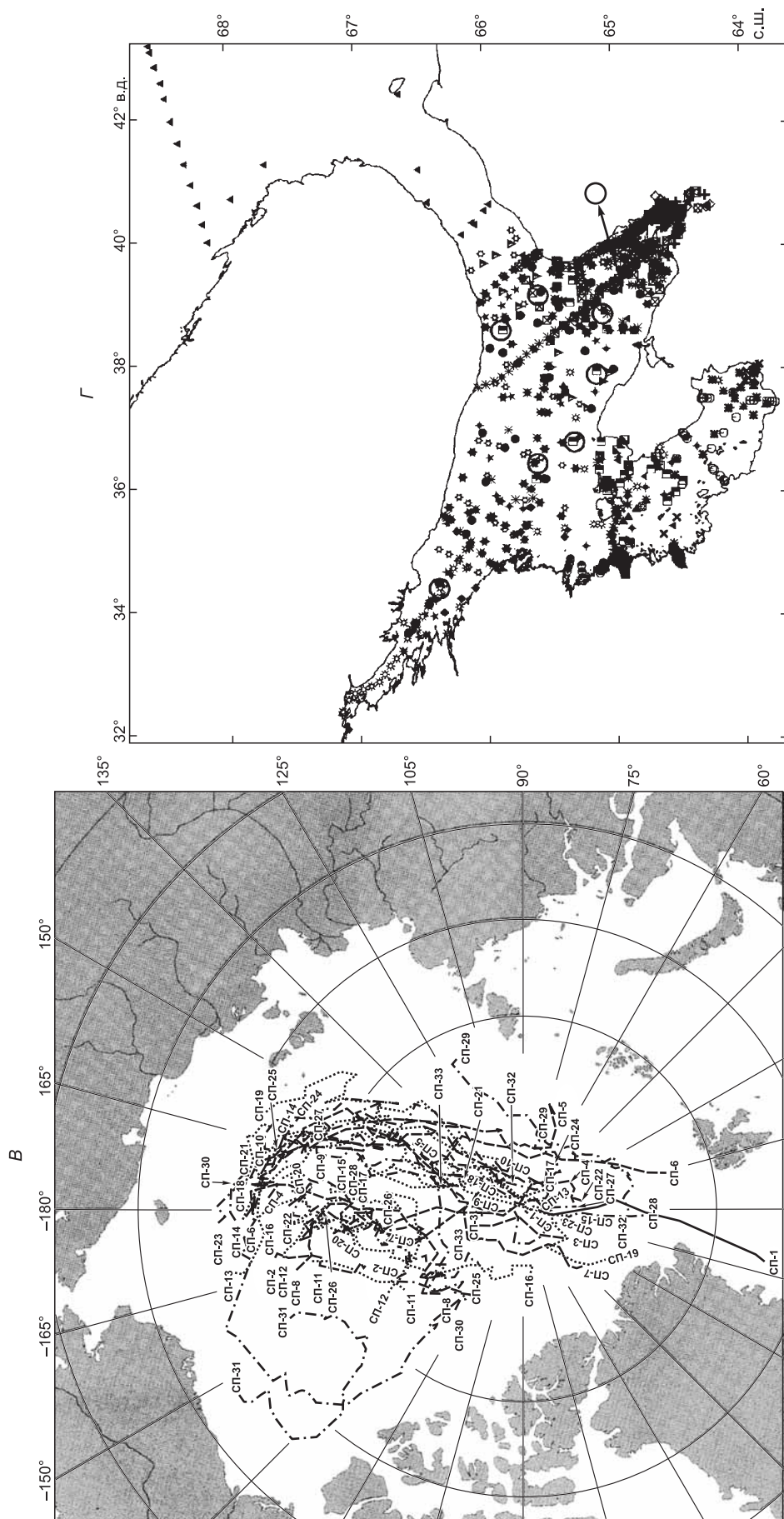


Рис. 2. Исследования по морской геологии в Арктике (до 2006—2008 гг.), по [Stein, 2008; Фролов и др., 2005].

A — станции с получением проб донных осадков (точки) до 2006 г. по данным информационной системы Пангеа; *B* — экспедиции судна «Полярштерн» (Германия) в 1987—2008 гг. 1—8 — номера рейсов. На врезке — девятилетние исследования канадской экспедиции Т-3 на дрейфующем острове-айсберге Флеггер; *B* — работы на российских дрейфующих станциях «Северный полюс-1—33»; *G* — исследования по геологии и океанологии Белого моря ИО РАН в 2000—2008 гг. Разными знаками даны станции разных лет.

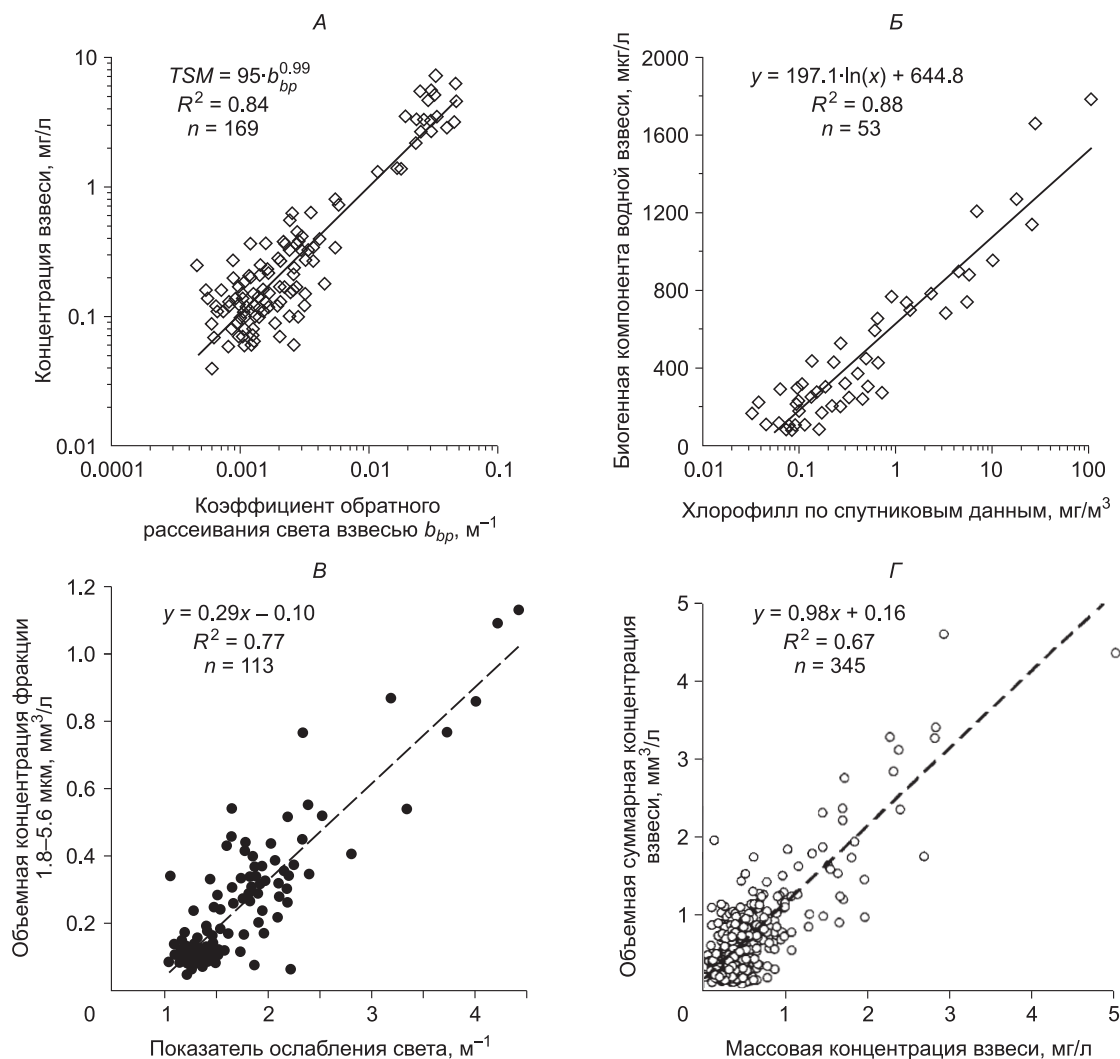


Рис. 3. Возможности спутниковых и гидрооптических бесконтактных методов определения взвеси и хлорофилла (маркер биогенных процессов) с верификацией прямыми определениями: ультрафильтрация на ядерных фильтрах — массовая концентрация и определение на счетчике Коултера (объемная концентрация).

Бесконтактные методы дают возможность охвата исследованиями больших площадей и быстрого зондирования глубин (вертикальное и горизонтальное зондирование).

A — спутниковые данные по обратному рассеянию — концентрации взвеси на поверхности; *B* — спутниковые данные по хлорофиллу (маркер биогенных процессов и работы фитобактериоценоза) — прямые определения на поверхности моря; *V* — гидрооптические определения (показатель ослабления света) — объемная концентрация частиц взвеси (фракция 1.8—5.6 мкг) по счетчику Коултера; *Г* — объемная концентрация взвеси (мм³/л) — массовая концентрация (мг/л).

Третий важный параметр спутниковой информации — растворенное органическое вещество («желтое вещество»), в основном гуминовые и фульвокислоты (обычно прослеживается его поступление в море с речными водами). Растворенное органическое вещество — пища для бактерий и мельчайшего планктона — нано-, пико- и фемтопланктона.

Наконец, четвертый — температура поверхностных вод — маркер поступления речных вод, а также развития апвеллинга и даунвеллинга, прохождения фронтальных зон и других особенностей циркуляции.

Сложной задачей является калибровка (верификация) этих дистанционных первичных спутниковых данных. Для этого необходимо сравнить прямые приборные определения с данными со спутников для времени их прохождения. На этой основе разрабатываются локальные или региональные алгоритмы, которые меняются как в пространстве (в разных местах), так и во времени (особенно по сезонам года).

После учета всех поправок строят карты распределения всех этих четырех компонентов для крупных водоемов или их частей, которые могут сопоставляться с соседними морями и с поверхностным

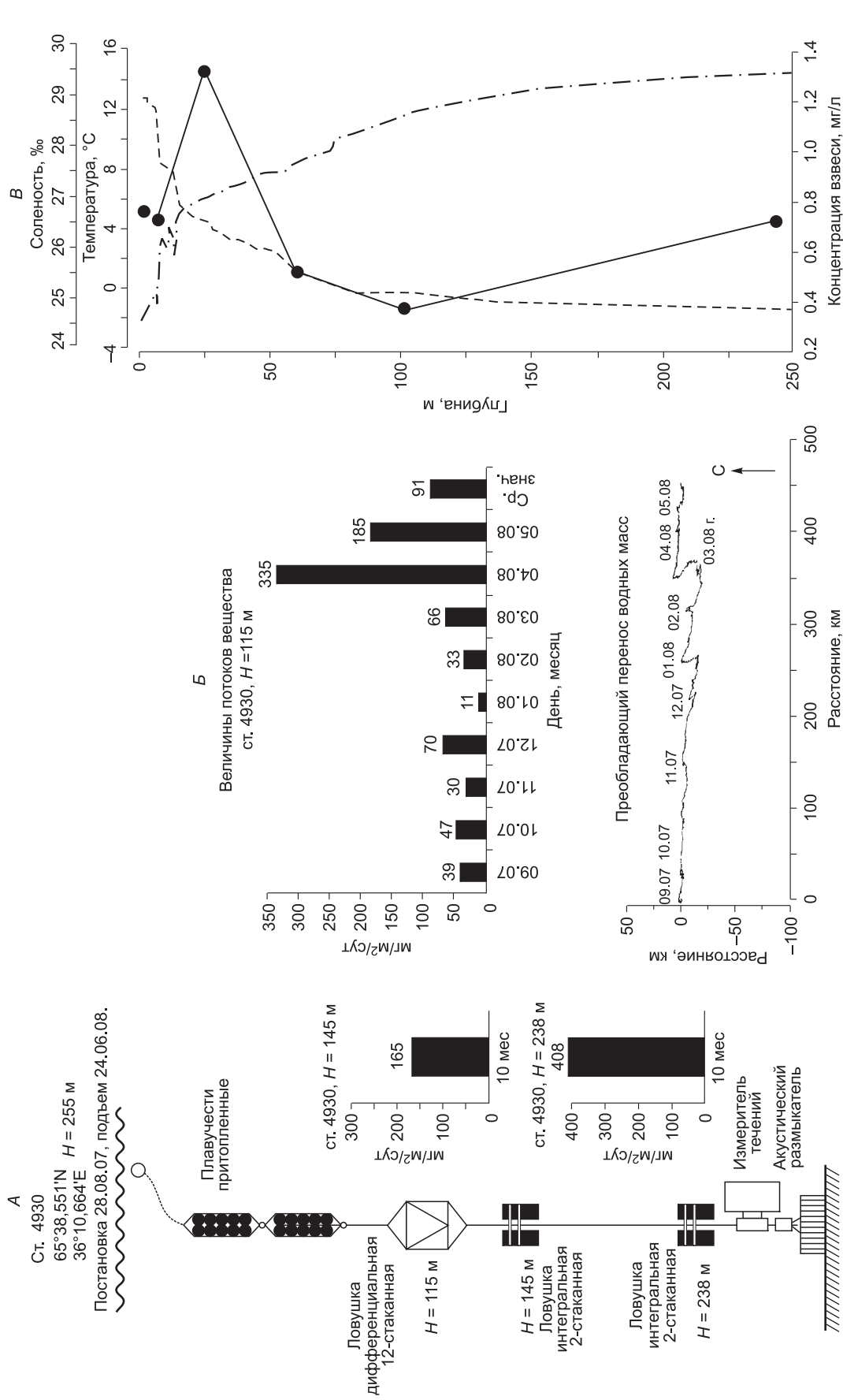


Рис. 4. Притопленная седиментационно-геохимическая платформа (Белое море) для инситного определения потоков рассеянного осадочного вещества и его компонентов (мг/м²/сут).

А — устройство притопленной платформы. Включает интегральные и дифференциальные ловушки, отбирающие пробы с заданной экспозицией, измерители течений, плавучести, якорную систему и акустический размыкатель, отделяющий платформу от груза (всплывающий платформу). Обычно платформы работают непрерывно (в том числе подо льдами) до глубин 5–6 км. *Б* — результаты работы притопленной платформы. Величины потоков вещества: среднее 9 мес. (для дифференциальной ловушки на глубине 115 м) и среднее за год для двух интегральных ловушек (глубина 145 и 238 м). Внизу — данные придонного измерителя течений (преобладающий перенос у дна). Скорости течений 5–25 см/с и направления не показаны. *В* — зондирование океанологической обстановки до постановки и перед подъемом платформы по 6–8 параметрам (показаны три — температура, соленость, содержание взвеси). Точки отбора проб воды для прямых определений (ультрафильтрация, хлорофилл, гидрохимия, счетчик Коултера и др.).

слоем для всего Мирового океана. Это позволяет не только получить общую картину и понять распределение этих компонентов по поверхности, но и выяснить места нахождения апвеллингов, прохождения фронтов, поступление «разбавляющих» вод с низкими содержаниями органики.

В конкретных условиях Арктики серьезным препятствием являются морские льды, а также облачность — поэтому наблюдения ведут непрерывно, а затем объединяют по декадам или по месяцам. В зимних условиях такого рода спутниковые исследования исключаются, их продолжают притопленные платформы.

Изучение наиболее сложноустроенного верхнего деятельного слоя (0—100—150 м), где возможен фотосинтез и где идут не только процессы образования разнообразного биогенного осадочного вещества, но также и процессы его растворения (рециклинга), выполнялось на ходу судна при помощи нового метода сканирования мультипараметрическими зондами и полуколичественными определениями скоплений фито- и зоопланктона доплеровскими системами, работающими на разных частотах [Лисицын, 2003, 2004, 2009].

Нижней границей «деятельного слоя» является слой скачка плотности (пикноклин), который выявляется и картируется при вертикальном непрерывном зондировании на станциях. В слое пикноклина накапливается значительное количество отмершего фитопланктона, а также детрит, частицы легких минералов (слой «жидкого дна»).

Важно количественно оценить осадочно-геохимические процессы, проходящие в деятельном слое (над пикноклином) в целом (т.е. в слое 0—150 м), прежде всего первичную продукцию фитопланктона, его видовой состав и свойства (биогенный материал фитопланктона), вторичную продукцию биофильтраторов зоопланктона (биогенный материал зоопланктона), состав и свойства вертикальных потоков осадочного вещества в виде пеллетов из деятельного слоя на глубины [Longhurst, 1998; Bauh, Polyakova, 2003].

Это удается сделать двумя независимыми способами: 1) вычислительным, который используется планктонологами [Виноградов, Шушкина, 2001], и 2) по ^{234}Th и другим изотопам. Наибольшее значение для седиментолога представляет не просто значение, а состав потока рассеянного осадочного вещества, выходящего из деятельного слоя на глубину. Поэтому главный способ прямого изучения потоков и состава осадочного вещества — седиментационные ловушки непосредственно под деятельным слоем [Zeitchell et al., 1978; Nonjo et al., 2008] (см. рис. 3, 4). Эти ловушки, о которых будет сказано отдельно, отбирают осадочный материал инсисто в флакон с фиксатором пробы рассеянного вещества, причем через заданные интервалы времени — сутки, неделю, месяц. Значения потоков получаются количественные (мг/м²/мес) и после аналитической обработки пробы могут быть получены значения не только общего потока вещества, но и вертикальные потоки для элементов и компонентов всех составляющих потока ($\text{C}_{\text{орг}}$, CaCO_3 , терригенный материал, аморфный кремнезем, потоки отдельных минералов, фракций гранулометрического состава, панцирей и раковин планктона и др.).

Седиментационные ловушки, входящие в систему притопленных платформ, устанавливаются обычно на круглый год с интервалом пробоотбора во флаконы — 1 мес. Они могут работать автономно и автоматически под покровом льдов, в условиях штормов и полярной ночи.

Под каждой седиментационной ловушкой нами устанавливается гидрологическая вертушка с термометром, что дает возможность (одновременно со сбором осадочного материала потока) определять ежечасно не только скорость, но и направление течений, вести непрерывное круглогодичное определение векторов течений для горизонта отбора взвеси, т.е. определять реальные векторы потоков осадочного вещества (не только вертикальные, но и наклонные), а также их изменения во времени.

Глубинные горизонты водной толщи изучаются так же тщательно, как и «деятельный слой». На океанографических станциях исследования начинают с вертикального зондирования водной толщи гидрооптическим и гидрофизическими зондами (до 9—10 параметров), после чего на основании записей на компьютерах проводят выбор наиболее важных точек отбора проб батометрами для верификации данных электронных датчиков и, главное, для инсистного гранулометрического и вещественного изучения состава проб рассеянного осадочного вещества. Таким образом, проводят верификацию записей непрерывного гидрооптического зондирования. Общее количество проб и объем отбираемой воды зависят от задачи — обычно достаточно 10 л, но для более детальных случаев отбирают до 100 л и больше (определение радиоактивности, коллоидов, нано- и пикопланктона, диатомовых и динофлагеллят, спор и пыли и др.).

После работ по непрерывному зондированию с последующим отбором необходимых проб «прицельно» производится установка на избранных глубинах седиментационных ловушек в паре с автоматическими гидрологическими вертушками (см. рис. 4) для непрерывных круглогодичных наблюдений. По всем основным параметрам исследования пробы отбирают и для поверхности, и для глубинных слоев практически непрерывно и синхронизированно по времени, чем исключается пропуск каких-то необычных явлений и катастроф.

Особого внимания требует изучение придонного слоя, который, как показывают прямые измерения, в том числе и изучение взвеси (гидрооптика + отбор проб для фильтрации на атомных фильтрах), достигает толщины 100 м, а в отдельных случаях в океане — до 500 м. В придонном слое стремятся участить горизонты отбора при зондировании, а также устанавливают одну или две дополнительные седиментационные ловушки и одну—две вертушки. Одна из ловушек ставится на дно или закрепляется в пределах первых метров от поверхности дна, вторая — на удалении 10—20 м от дна. Придонная постановка нередко дополняется еще одной придонной подстанцией (оборудованной ловушкой или вертушкой). Нередко устанавливают вертикальную цепочку из 5—10 простых (не автоматических) одностаканных ловушек для детальных исследований в пограничном слое динамики «водная взвесь—донный осадок» или для изучения процессов естественного отжимания поровых вод из осадка (также лендеры различных конструкций).

При постановке придонных ловушек верхний слой донных осадков может рассматриваться как седиментационная ловушка с установкой на сотни и тысячи лет непрерывного действия с диаметром отверстия, равным всему водоему или его участку.

Таким образом, удастся с применением новой техники не только вести непрерывные инситные наблюдения, но и обеспечивать регулярное получение ненарушенных проб с разных глубин моря, проб, собранных для строго определенных интервалов времени. Дальше эти пробы обрабатывают методами, принятыми в литологии, геохимии, физической океанологии и биологии.

В распоряжении седиментолога и геохимика оказывается массив уникальной информации — инситной, непрерывной во времени, охватывающей всю толщу вод: 1 — непрерывная спутниковая для их верхнего особосложного слоя; 2 — полученная с поверхности и с глубин опорных (1—3-го) горизонтов ловушками и гидрологическими вертушками и регулярно повторяемая вертикальным зондированием; 3 — информация для другого особосложного придонного слоя; 4 — непрерывная информация, запечатленная в самом верхнем (деятельном) слое донных осадков (это интегрирующая часть осадочного процесса, его начальной стадии до диагенеза).

Обычно устанавливают не одну, а несколько таких притопленных платформ в ключевых точках водоемов или располагают их на разрезах, например, уходящих от устьев крупнейших рек в море, в проливах, через линии гидрологических фронтов и областях апвеллингов. Это прообраз систем и седиментогеохимического изучения и мониторинга морей и океанов в будущем.

В Белом море нам удалось поддерживать сеть седиментационных наблюдений с постоянным размещением в море до 5—10 круглогодичных притопленных платформ на протяжении 10 лет.

Работу автоматических платформ обычно дополняют и развивают дополнительными исследованиями в рейсах, используя время переснащения платформ и их контроля. Особенный интерес представляют более углубленные исследования верхнего деятельного слоя (в частности, суточные изменения фито- и зоопланктона), а также изменения планктона и взвеси в отдельных водных массах, например, в зоне смешения пресных и морских вод по мере роста солености. Такие исследования в системе координат Лагранжа могут выполняться дрейфующими (не заякоренными) станциями, которые свободно перемещаются вместе с водами поверхностного слоя. При работе в верхней и средней частях континентального склона большой интерес представляет изучение каскадинга и контурных течений с помощью платформ, а в нижней — специальные исследования гравититов и др.

Эти системы, сочетающие заякоренные (опорные) платформы с дрейфующими (и временными), синхронизируются по времени и привязываются к опорным данным спутников.

Применение седиментационных ловушек в комплектах с другими приборами превратили седиментологию и геохимию из области догадок и, нередко, необоснованных теорий в экспериментальную науку о фактах, почерпнутых из самой гущи природных процессов, проходящих на глубинах и особенно в местах, ранее недоступных (Арктика, Антарктика), с непрерывным во времени и количественными наблюдениями нового типа.

Содержание осадочного вещества или химического элемента, минерала, гранулометрической фракции, загрязнения, как отмечалось, теперь можно выразить не только в мг/л, но и определить величину потока мг/м²/год, прямыми измерениями определить скорость и вектор этого потока, его изменения во времени (по сезонам, годам и др.).

Таким образом, впервые появилась возможность не только видеть осадочный процесс вплоть до отдельных частиц в огромных водоемах морей и океанов, но и постоянно сравнивать увиденное с донными осадками тех же районов, хранящими запись этих процессов последних сотен и тысяч лет.

Познание процессов современного осадконакопления требует применения самых совершенных современных методов, и только после этого оправдывается выражение, что изучение современных процессов есть ключ к пониманию процессов прошлого. Пока это только подобие ключа.

Этот новый подход к изучению осадочного процесса в гидросфере дополняется нами еще обязательным и одновременным изучением рассеянного вещества в других геосферах, взаимодействующих с

веществом (атмо-, крио-, биосфера и антропосфера), а также процессов подготовки и транспортировки осадочного вещества в водосборах, ледосборах, атмосферных резервуарах.

Работу такого рода удалось впервые поставить и выполнить для ряда районов Арктики, правда, с большими трудностями и многими пробелами, которые, вероятно, будут восполнены другими исследователями.

Такое исследование, основанное на анализе микро- и наночастиц во всех внешних геосферах Арктики, проведенное по единой программе и методике, позволило сделать ряд открытий и реально оценить масштабы и уникальную специфику осадочного процесса в Арктике, включая взаимодействие с осадочным веществом всех геосфер в ходе формирования донных осадков.

Сопоставления процессов, проходящих в рассеянных формах осадочного вещества с их записями в донных осадках будет дано в отдельной работе.

ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ПОТОКИ РЕЧНОГО ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН С СУШИ: ОСОБЕННОСТИ ЛИТОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ, МАРГИНАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Исследования жидкого и твердого стока начаты в нашей стране значительно раньше, чем в США и Канаде. Уникальные массивы наблюдений Гидрометеослужбы и многочисленных экспедиций дополняются нашими собственными исследованиями с детальным изучением геохимии взвеси, которые проводились (с перерывами) 35 лет [Морозов и др., 1974; Гордеев, 1983, 2009; Чудаева, 2002; Шулькин и др., 1983]. Эти материалы собраны и обработаны по единой методике, часто с участием иностранных специалистов с международной интеркалибрацией. В 1989—1995 гг. в Арктике работала крупная российско-французско-нидерландская экспедиция «SPASIBA». Другой международный проект «ЛОИРА» («Взаимодействие суша—океан в Российской Арктике») работала по зонам смешения река—море (1997—2007 гг.). По ее результатам было проведено пять международных конференций [Лисицын, Гордеев, 2003]. Для морей Лаптевых и Карского важные материалы получены в многочисленных 15-летних совместных русско-германских исследованиях.

Водный сток рек в Арктику, по данным на 2009 г., составляет 3311 км³/год (из них Канадская Арктика поставляет 367 км³) [Гордеев, 2009] (рис. 5). Поток взвешенного речного осадочного вещества с суши в Ледовитый океан — 227.3 млн т/год (без учета захвата в маргинальных фильтрах), а с учетом захвата 22.7 млн т/год.

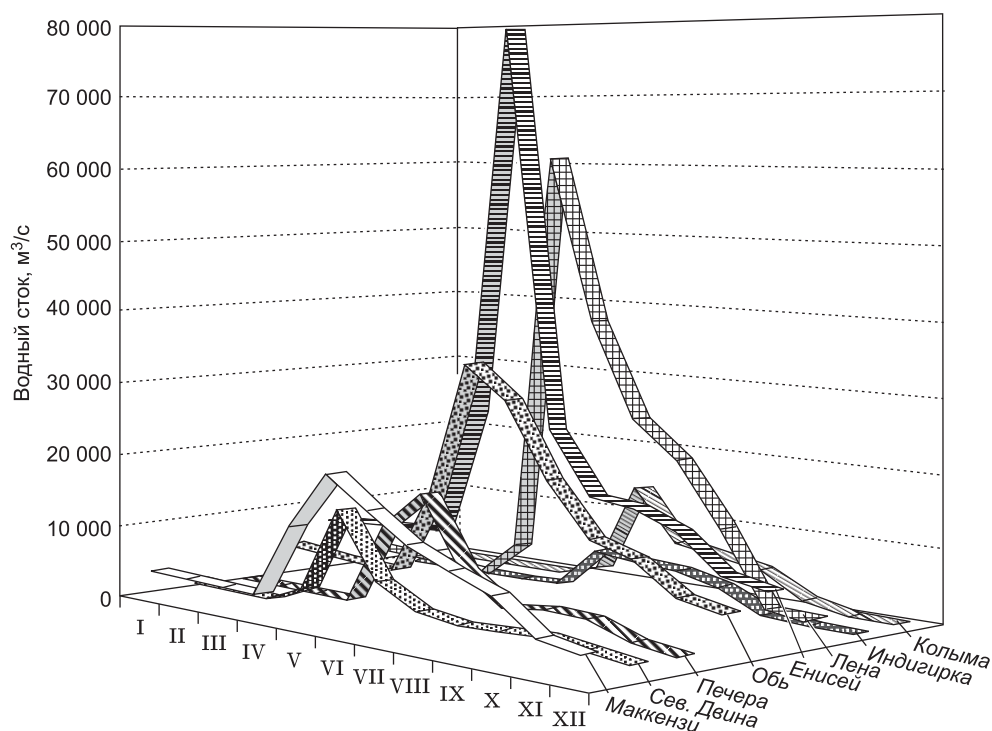


Рис. 5. Сезонные изменения водного стока (горизонтального потока осадочного вещества с суши в океан) крупнейших рек Арктики [Гордеев, 2009].

Четко выделяются летние пики водного стока, когда выносятся до 60—80 % годового поступления речного осадочного вещества.

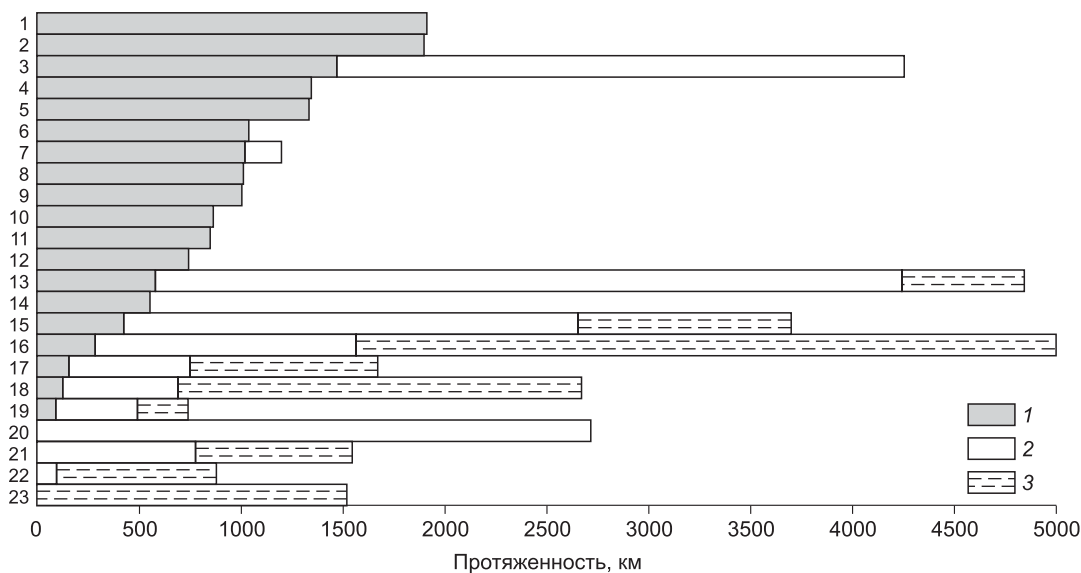


Рис. 6. Распространение многолетней мерзлоты в водосборных бассейнах рек Арктики (протяженность русла через области с разным развитием мерзлоты) [Walker, 1998].

1 — сплошная мерзлота; 2 — прерывистая мерзлота; 3 — участки без мерзлоты. Реки (1—23): 1 — Оленек, 2 — Колыма, 3 — Лена, 4 — Хатанга, 5 — Индигирка, 6 — Яна, 7 — Дубент, 8 — Анадырь, 9 — Бак, 10 — Анабар, 11 — Пяси́на, 12 — Коппермайн, 13 — Енисей, 14 — Колвилл, 15 — Маккензи, 16 — Обь—Иртыш, 17 — Черчилл, 18 — Нельсон, 19 — Северн, 20 — Юкон, 21 — Печора, 22 — Албани, 23 — Сев. Двина.

По данным В.В. Гордеева [2004], площадь водосбора рек Российской Арктики составляет более 13 млн км², а твердый сток рек — 102 млн т/год, т.е. около половины общего. Обращает на себя внимание очень малое содержание взвешенных частиц в речной воде — в среднем около 36 мг/л (при колебаниях от 6 до 207 мг/л). Это в 13 раз ниже среднего мирового значения (460 мг/л), т.е. для рек Арктики типичен дефицит рассеянного осадочного вещества, поступающего с равнинного водосбора, покрытого тайгой и тундрой.

Средний модуль твердого стока (вынос взвеси с 1 км² водосбора) составляет 7.8 т/км², при среднем значении для водосборов мира — 116 т/км², т.е. в 15 раз ниже. Это связано в первую очередь с мерзлотой и слабым выветриванием, с общим равнинным рельефом водосбора и таежно-тундровой растительностью, удерживающей взвеси, а также с многолетней мерзлотой в водосборах рек (рис. 6).

Мутность рек и модуль смыва растут при движении вдоль побережья на восток — от равнинных водосборов (к западу от р. Лена) до гористых, характерных для Восточной Сибири. Реки западной части водосбора скованы льдами 4—6 месяцев в году, а восточной — до 8 месяцев. Также с запада на восток меняется время паводка, когда реки сбрасывают в море главную часть взвеси (45—65 % от годового, с максимумом в 80 % для р. Оленек). На реках Западной Арктики паводок в мае, Восточной — в июне. Минерализация большинства рек также ниже среднемировой, максимум отмечается зимой. В нижнем течении рек и прилегающих частях морей были проведены по единой программе геолого-геохимические и биогеохимические исследования растворенных и взвешенных форм осадочного вещества [Land-ocean systems..., 1999; Гордеев, 2004, 2009; Stein, 2008].

В ходе этих исследований с особым вниманием изучалась рассеянная форма осадочного вещества (взвесь) с выделением ее методом мембранной фильтрации, в ряде случаев и сепарации, а для получения больших количеств взвеси из рек — методом осаждения из больших объемов воды. Эти прямые методы постоянно дополнялись комплексом бесконтактных гидрооптических — спутниковых (с верификацией прямыми определениями содержания взвеси в водах и непрерывным горизонтальным и вертикальным гидрооптическим зондированием), определениями хлорофилла и растворенного органического вещества. В этих рейсах в больших масштабах (при солености >5 ‰) использован счетчик Коултера для инситу-определения гранулометрического состава взвеси без применения пресной воды и химических реагентов.

Работы в реках и на границе река—море сопровождалась полным океанологическим комплексом (физика, химия, биология и морская геология) [Лисицын, Виноградов, 1994]. Детальное изучение процессов на границе река—море привело к важному открытию явления маргинального фильтра, который удерживает до 93 % от взвешенных веществ речного стока и около 40 % растворенных форм [Лисицын,

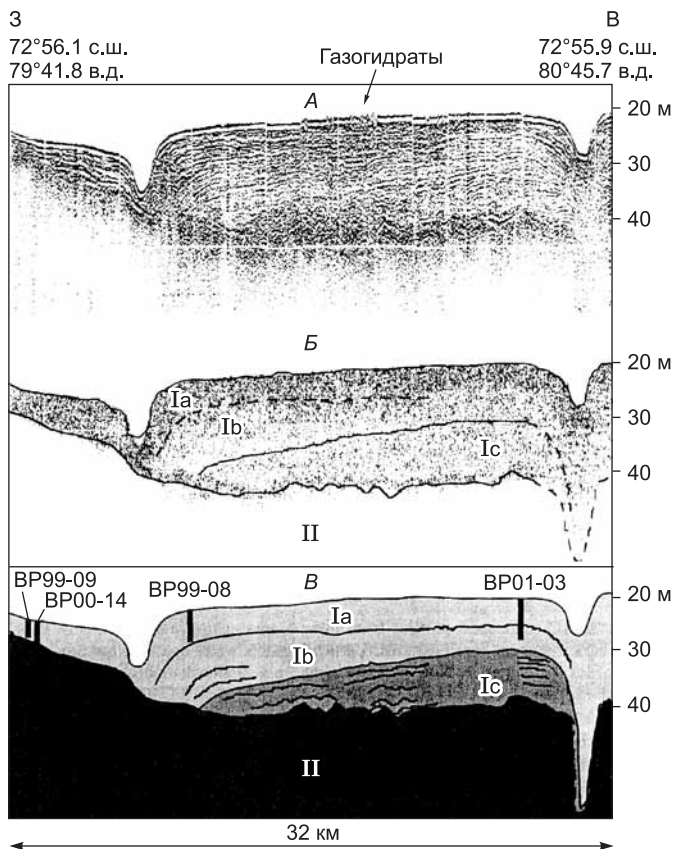


Рис. 7. Часть линзы осадочного вещества в маргинальном фильтре р. Енисей по акустическим (А) и сейсмическим (Б, В) данным, а также опробование грунтовыми трубами от BP99 до BP01 [Dittmers et al., 2003].

История фильтра за последние 9 тыс. лет. Слой II — доголоценовый фундамент, уровень — на 30 м ниже современного, видно палеоруло Енисея, депоцентр в это время смещался к северу (с 72° на 73° с.ш.). Свое настоящее положение маргинальные фильтры Оби и Енисея заняли с окончанием голоценовой трансгрессии ~5 тыс. лет назад. За это время в эстуарии Оби накопилось $14.3 \cdot 10^{10}$ т осадков, а Енисея $9.2 \cdot 10^{10}$ т — образовались крупные осадочные бассейны — маргинальные фильтры, богатые органикой, с многочисленными песчано-алевритовыми прослоями.

1994б; Lisitzin, 1998; Гордеев, 2009], что получило подтверждение в нескольких экспедициях в Карское море в устья рек Обь и Енисей [Stein, 2008], а также при работах в других климатических зонах [Емельянов, 1998; Chakrapani, 2005].

Сущность этого процесса, имеющего глобальные масштабы, состоит в смешении двух конечных членов ряда смешения: речной и морской воды. Каждый из конечных членов имеет свой состав взвеси, свои коллоидные и

биологические системы, микроорганизмы и др. При смешении вод происходит воздействие электролита — морской воды — на коллоидную систему речной воды. Сила этого воздействия определяется соленостью. Соленость определяет также и распределение планктонных стенохалинных организмов и бактерий, т.е. является ведущим фактором процесса взаимодействия этих вод. Поскольку под воздействием электролита происходит коагуляция, флокуляция, осаждение и соосаждение тонкого материала, который определяет прозрачность вод в зоне смешения, а следовательно, и возможность фотосинтеза (т.е. толщину его слоя (ФАР)).

Все процессы по интенсивности их проявления разделяются по мере роста солености на три этапа: 1 — гравитационный, связанный со снижением скорости течения при впадении реки в море; 2 — коагуляционно-флокуляционный, связанный с перестройкой коллоидных систем и осаждением главной части речной взвеси, образованием свежих сорбентов, процессами сорбции — десорбции; 3 — биогенной очистки вод, который начинается с просветления воды на втором этапе (т.е. увеличения толщины слоя фотосинтеза), что (вместе с высоким содержанием биогенных элементов в речных водах) дает возможность расцвета фитопланктона, а вслед за ним зоопланктона и бентоса. Это заключительная биологическая ступень фильтра, на которой происходит удаление из воды (связывание во взвесь) не взвесей, а растворенных форм элементов и загрязнений.

Работа системы маргинального фильтра описана в статьях [Лисицын, 2004, 2009], вошла во многие монографии [Лисицын, 2001а; Stein, 2008] и потому здесь не рассматривается в деталях.

Важно отметить, что предложенная мною принципиальная схема в природной действительности может реализоваться по-разному. Так, во время паводка границы этапов смещаются в сторону моря, а зимой — прекращается фотосинтез и отключается биологическая ступень фильтра. При очень низких мутностях речных вод слой фотосинтеза продвигается ближе к устью реки. Многие особенности этого важнейшего для седиментологии явления еще предстоит изучить. На рис. 7 показана часть линзы осадочного материала в маргинальном фильтре р. Енисей (длина около 30 км, мощность до 40 м).

Важно подчеркнуть выводы общего значения, основанные на многолетних исследованиях.

1. На границе река—море происходят значительные потери в содержании как взвешенной (около 93 %), так и растворенной (около 40 %) частей осадочного вещества. В итоге экспорт—сток речной взвеси равен в среднем около 10 %, т.е. около 1/10 от тех значений, которые использовались литологами для построения моделей седиментации. Экспорт-сток растворенный составляет около 50—60 % от определенного для нижнего течения реки (вне воздействия морских вод). В 10 раз снижается реальная поставка

взвешенного терригенного речного материала реками и отсюда возрастает относительный вклад других видов осадочного вещества (эолового, ледового, биогенного и вулканогенного).

Маргинальные фильтры являются природными ловушками загрязнений — как во взвешенной, так и в растворенной формах. Подсчеты резиденс-тайм для элементов в океане, определенные без учета потерь в фильтрах, ошибочны.

2. При переходе от речных вод к океанским резко меняется соотношение между взвешенными и растворенными формами элементов. Реки — это царство взвешенных форм элементов, океаны — царство растворенных форм элементов (включая элементы-гидролизаты).

3. Открытие и изучение маргинальных фильтров привело к существенной перестройке всей геохимии морей и океанов и стало возможным только при прямом (инситу) изучении взвесей, а также при прямом определении потоков осадочного вещества, оседающего в ходе смешения, седиментационными ловушками на разрезах река—море.

РАССЕЯННОЕ ОСАДОЧНОЕ ВЕЩЕСТВО В АТМОСФЕРЕ АРКТИКИ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИНСИТНОГО ИЗУЧЕНИЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЛЬДОМ, СНЕГОМ, ПОВЕРХНОСТЬЮ МОРЯ

Геологи-осадочники обычно считают роль аэрозольного осадочного вещества незначительной (за исключением аридных зон суши). Между тем за последние десятилетия получен независимыми методами обширный материал, показывающий, что вклад осадочного вещества из атмосферы в донные осадки морей и океанов обычно находится в пределах от 10 до 90—100 % от вещества осадка, и что глобальное распределение аэрозолей значительно, их вертикальные потоки из атмосферы на поверхность океана строго зональны [Лисицын, 1978, 2001a; Duce et al., 1991; Шевченко и др., 2000; Шевченко, 2006].

Дальность переноса аэрозольного осадочного вещества огромна — в этом убеждают прямые исследования в аридных зонах на островах в океане и на побережьях, анализ почв в сопоставлении с составом аэрозолей, минералогические и изотопные исследования. Все эти независимые данные однозначно доказывают, что горизонтальные потоки аэрозольного материала очень велики, они пересекают океаны (в том числе и крупнейший — Тихий океан), а по вертикали в ряде случаев поднимаются до высот в 15—17 км, наконец, что перенос аэрозолей в атмосфере может идти на разных высотных уровнях (в том числе на уровне струйных течений со скоростями до 300 км/ч и более) [Лисицын, 1978].

Независимые подтверждения получены при анализе распространения продуктов ядерных взрывов в атмосфере, дымов крупных пожаров, пеплов вулканических извержений и др.

Максимальных содержаний аэрозольный материал достигает в аридных зонах суши, которые продолжают в океаны в виде двух аридных глобальных областей переноса аэрозолей, называемых Северным и Южным поясами [Лисицын, 1978]. Эти пояса связаны с питающими провинциями — пустынями Африки, Ближнего Востока и Центральной Азии в Северном полушарии и Австралии — в Южном. Значения вертикальных потоков рассеянного аэрозольного вещества здесь достигают 1000—10000 мг/м²/год, а изучение состава донных осадков в этих аридных поясах (оси их на 30° с.ш. и ю.ш.) и их сопоставление с аэрозолями показывает, что они более чем на 90 % состоят из эолового терригенного вещества. Это явление не могли идентифицировать долгое время, поскольку в то время прямые определения состава и свойств рассеянного аэрозольного вещества отсутствовали.

Казалось бы в Арктике, большую часть года покрытой белым снегом и льдом, этот вид осадочного вещества не имеет значения. Однако наши прямые определения, которые сделаны для сотен точек в разных частях Арктики от Белого моря до Северного полюса, арктических морей и островов [Лисицын, 1978; Шевченко, 2006] показали, что содержание аэрозольного материала в снеге (после его плавления) в 2 и более раз выше, чем среднее для морской воды Арктики!

Концентрации рассеянного осадочного вещества в атмосфере Северного Ледовитого океана по прямым определениям для 55 проб в центральной части колебались от 0.02 до 0.97 мкг/м³, в среднем 0.23 мкг/м³, в то время как в аридной зоне Атлантики оно много выше 17.4 мкг/м³ (среднее по 20 пробам) [Лисицын, 1978; Шевченко, 2006].

Вымывание аэрозольного материала из атмосферы снегом — главный путь осаждения частиц из атмосферы Арктики на ее ледовую поверхность. Содержание аэрозолей в снеге для 16 проб Белого моря составляло 0.84 мг/л, по данным для других лет от 0.22 до 1.6 мг/л [Шевченко и др., 2006]. Главная поставка эолового материала (в отличие от других зон) в Арктике идет зимой при высокой сухости атмосферы, главное значение имеет вымывание снегом, причем аэрозольного вещества не местного, а дальнего переноса, поскольку местные источники аэрозолей основную часть года скрыты снегом и льдом.

Глобальная трасса переноса воздушных масс (и аэрозолей) в Арктике идет с запада (из Атлантики и Европы) на восток и загрязнения из Европы и с Кольского полуострова попадают в Российскую Арктику. Для разных сезонов года и климатических обстановок реальные пути перемещения воздушных масс и аэрозолей определяются по обратным трассам (по данным ВМО) [Виноградова, Полиссар, 1995; Виноградова, Егоров, 1997].

Поскольку все реки Арктики имеют снеговое питание (50—80 %), то вклад талых снежных вод (и рассеянного аэрозольного материала снега) в значительной мере определяет состав паводковых речных вод.

Для Арктики важным является и то, что из атмосферы на поверхность суши и моря выпадает заметное количество биогенных элементов (они обеспечивают питание растений аэротрофов (сфагнум, лишайники)) на верховых болотах и поднятиях водосбора [Бязров, 2002].

Данные о катастрофических загрязнениях Арктики, в том числе и аэрозолями, которые приводились в печати, обычно ошибочны — это чаще всего локальные (или региональные) загрязнения (Норильск, часть Кольского п-ова, нефтяные и газовые промыслы Западной Сибири).

Общий вклад потока аэрозолей в осадкообразовании в пелагиали Арктики на основании всех материалов мы в настоящее время оцениваем как 10—15 % от общего.

Величины вертикальных потоков аэрозоля, определенные прямыми методами колеблются от 140 до 624 мг/м²/год и зависят от сезона и места получения пробы [Лисицын, 2001a]. Определения для Белого моря проводились с 2001 до 2008 г. независимыми методами: 1 — изучение комплексом методов аэрозолей в ходе морских экспедиций в приводном слое (совместно с Институтом оптики атмосферы и Физики атмосферы СО РАН); 2 — непрерывные на протяжении года определения вертикального потока аэрозолей на станциях Соловецкие острова и Архангельск; 3 — определение содержания аэрозольного материала в снеге; 4 — определение в растениях-аэротрофах (лишайники, мхи); 5 — определения в верховых болотах, которые не имеют речного стока; 6 — определения аэрозольных потоков прошлого по торфяникам верховых болот, т.е. история аэрозольных потоков [Шевченко и др., 2006; и др.].

Средние значения вертикальных потоков аэрозолей для Арктики 100—1000 и даже менее 100 мг/м²/год, т.е. на 2—3 порядка ниже, чем в аридных зонах, т.е. аэрозольный материал здесь хотя очень необычный и важный, но составляет только 10—15 % вещества донных осадков, что существенно, имея в виду потери речного материала в маргинальных фильтрах.

Мы не имеем возможности остановиться на многих важных деталях и открытиях, которые были сделаны в ходе этих работ. Отметим лишь, что данные по рассеянному осадочному материалу в атмосфере Арктики получены очень обширные, и они дополняются материалами по аэрозолям Сибири, которые проводили сотрудники разных институтов в содружестве с исследованиями аэрозолей Северной Европы, Арктики и Сибири [Шевченко и др., 1998, 2000, 2006; Куценогий, Куценогий, 2000].

Удалось детально изучить и закартировать не только концентрации и потоки, но и минеральный состав аэрозолей, содержание различных химических элементов и загрязнений, радиоактивных элементов и изотопов, а также $C_{орг.}$ и различных органических загрязнений [Немировская, 2005]. В целом изученность рассеянного осадочного вещества в настоящее время (для приводных слоев атмосферы Арктики) приближается к изученности морской и ледовой взвеси, речных вод, хотя «белых пятен» осталось достаточно.

ПОДГОТОВКА И ТРАНСПОРТИРОВКА ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА ЛЬДАМИ: ПОТОКИ ЛЕДОВОГО МАТЕРИАЛА, СЕПАРАЦИЯ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА, КРИОДЕПОЦЕНТРЫ И КОВРОВАЯ РАЗГРУЗКА

Площадь паковых (круглогодичных) и однолетних (тающих в конце лета) льдов в Арктике меняется по сезонам и от года к году [Захаров, 1996]. В среднем площадь ледового покрова в Арктике меняется за год от 11.4 млн км² в марте (конец зимы)* до 7 млн км² в сентябре (конец лета), т.е. на долю паковых многолетних льдов приходится около 7 млн км², а на долю тающих за лето — 4.4 млн км² [Котляков, 1994] (рис. 8, 9).

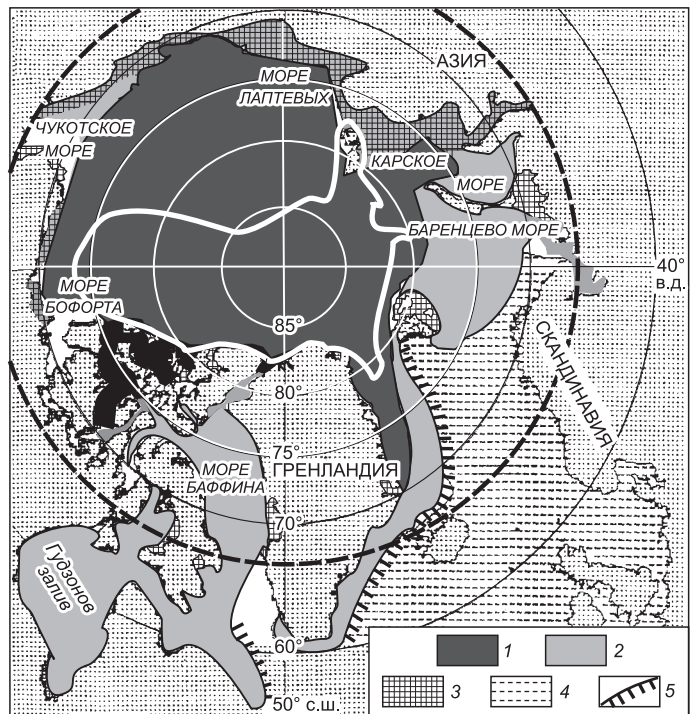
Даже в суровые зимы в СЛО возникают обширные области, лишенные льда, — заприпайные полыньи на границе неподвижного припая и дрейфующих льдов (рис. 9). Они возникают под воздействием сгонных ветров, отжимающих дрейфующий лед от припая, особенно сильных по периферии Восточно-Азиатского антициклона, где сильные и продолжительные ветры сопровождаются очень низкими температурами (до -40 °С). Это приводит к переохлаждению не только поверхностного слоя, но и значительной толщи воды. Начинается образование внутриводного (а иногда и донного) льда вокруг ядер кристаллизации — частиц водной взвеси. Кристаллики пресного льда, образующиеся при этом, становятся легче относительно вмещающей их морской воды (процесс холодной дистилляции). Они оказываются как бы прикрепленными к частицам взвеси и, как поплавки, быстро всплывают на поверхность, где собираются в виде ледовой шуги. Это первый тип ледового насоса, именно он обеспечивает поставку в Центральную Арктику около 50 % из моря Лаптевых и около 25 % из Карского, т.е. эти два моря — главные поставщики молодых льдов.

* По данным за последние годы, 15.1 млн км².

Рис. 8. Типы льдов Арктики и Субарктики.

1 — многолетние (паковые), 2 — однолетние дрейфующие льды; 3 — главные области распространения неподвижных льдов — припая; 4 — безледные части Северного Ледовитого океана; 5 — фронты круглогодичной разгрузки дрейфующих льдов — места их встречи с теплыми течениями.

Дрейфующие льды не контактируют с дном. Они нарастают зимой, захватывая подледный осадочный материал. Поверхность льда — также планшет для осаждения аэрозолей. Припайные льды захватывают при замерзании осадки прибрежной зоны, по их границе с дрейфующим льдом возникают запрпайные полыньи. Белой линией выделено минимальное распространение льдов по спутниковым данным с 1980 по 2007 г. Минимум 12 сентября 2007 г., когда площадь льдов по сравнению с 1980 г. уменьшилась в 2 раза — с 7 млн км² (1980) до 3.5 млн (2007), по данным НАСА.



Сильным ветром шуга сбивается к границам дрейфующего льда и смерзается. Идет работа «ледового насоса», избирательно захватывающего частицы взвеси и концентрирующего их в новообразованных льдах (конжеляционный лед). Далее они включаются в поток дрейфующих льдов с разгрузкой в местах таяния — обычно на тысячи километров от места захвата частиц! Таких явлений переноса взвеси по поверхности на тысячи километров не бывает в других зонах литогенеза!

Общий объем льдов Северного Ледовитого океана в период их максимального распространения составляет 34.55 млн км³ (а в конце лета, т.е. в период минимального распространения, 25.3 млн км³ — это объем паковых льдов, сохраняющихся круглый год). На долю однолетних льдов приходится 9.25 млн км³, их общий объем превышает годовой сток всех рек Арктики, причем, как отмечалось, льды имеют в своем составе значительное количество тонкого рассеянного и более крупного осадочного материала [Лисицын, 1978; Eicken et al., 2005].

Важные прямые данные получены нами на основе изучения рассеянного осадочного вещества при взаимодействии атмосферы и морских льдов. Это взаимодействие большую часть года идет через снежный покров на поверхности льда [Василенко и др., 1985]. Снег вымывает осадочный материал (взвешенный и растворенный) из атмосферы — это главный вид атмосферных осадков в Арктике. Его толщина на поверхности льда в конце зимы достигает 30—40 см, а по мере приближения к Атлантике и больше [Гаврилов, 2009].

Ледовая поверхность — это уникальный природный планшет для осаждения и накопления снега аэрозолями (влажное выпадение) и атмосферного рассеянного осадочного вещества, выпадающего на протяжении продолжительной полярной ночи (сухое выпадение). Сделаны пока немногочисленные прямые определения количественного содержания и состава атмосферного осадочного вещества, выпадающего со снегом в Арктике [Виноградова, Егоров, 1996; Шевченко и др., 2000; Виноградова, Полиссар, 2005; Шевченко, 2006]. В конечном счете удастся определить поток эолового материала из атмосферы на поверхность моря за год и по сезонам — пока со значительным приближением — и сопоставить его с потоком осадочного вещества на поверхность водосбора (суши), также скрытого зимой снежным покровом.

Как известно, реки водосбора Арктики имеют в основном снеговое питание, т.е. весной это талые воды, собирающие рассеянный осадочный материал атмосферы, которые скатываются с замерзшей поверхности тундры и тайги, а далее в ходе паводка захватывают осадочный материал, накопившийся на дне речных плесов. Происходит смешение осадочного материала атмосферы и собственно речного осадочного вещества.

Иначе идет процесс в море. При весеннем таянии снег превращается в воду снежных озер на поверхности ледовых полей и далее при таянии этих полей (однолетний лед) уходит в морскую воду.

Для многолетних полей (их возраст достигает 10—15 лет в канадском круговороте), процесс связан с сезонными изменениями: при весенне-летнем таянии также образуются снежицы на поверхности льда, но большая часть льда сохраняется, а часть пресной воды уходит в трещины. Осенью снежицы замерзают, рассеянный осадочный материал накапливается на их дне, а в начале зимы все снежицы

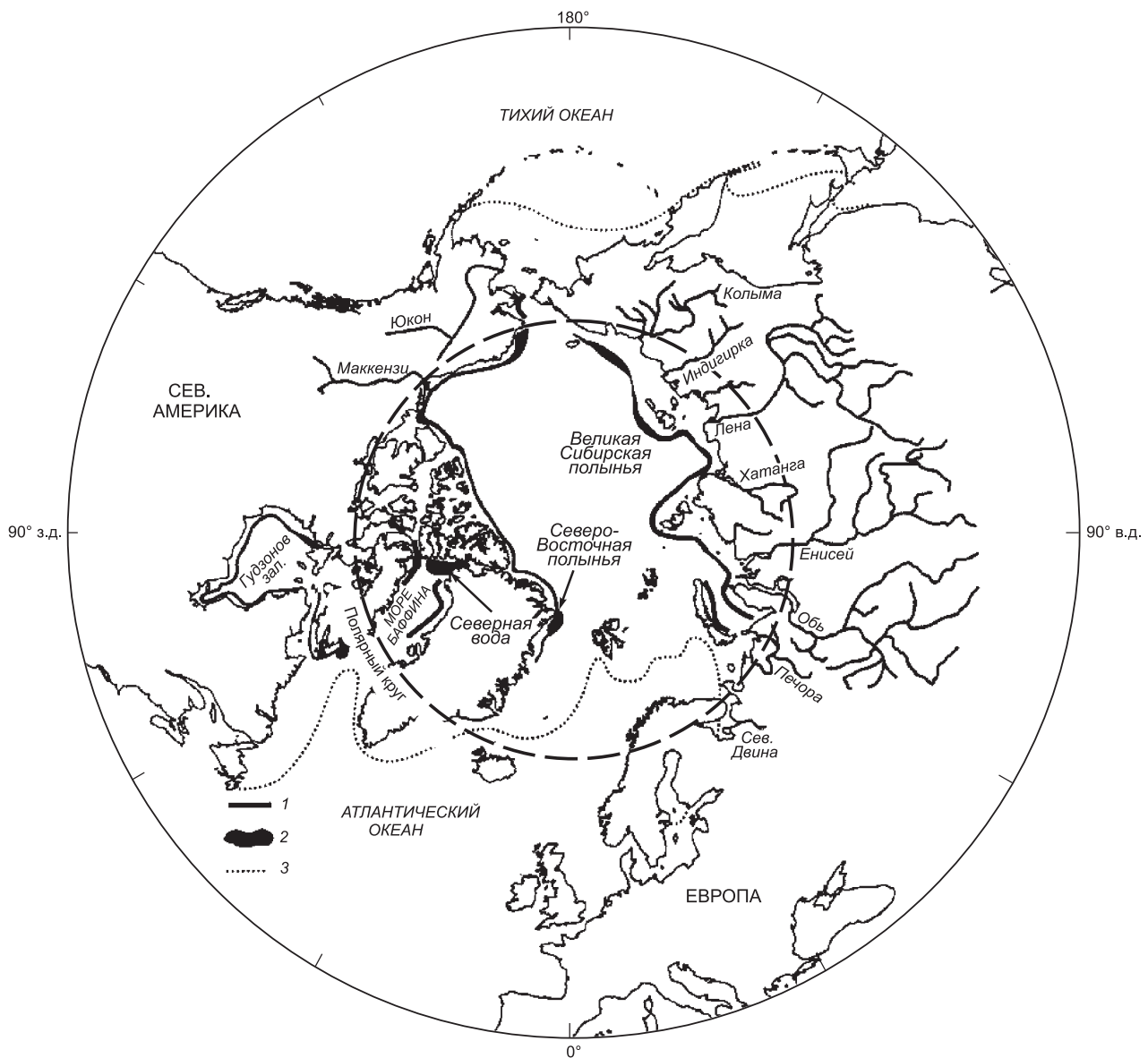


Рис. 9. Заприпайные польньи — одна из областей работы ледовых насосов в ходе образования внутриводного льда на частицах водной взвеси полярной ночью.

Самая крупная Великая Сибирская полынья длиной до 3400 км. Полюньи образуются также около островов. Связаны они с сезонными ветрами, отжимающими дрейфующий лед от края припая.

1 — области обычного распространения польней, 2 — крупнейшие польньи у берегов Северной Гренландии. 3 — Южная граница распространения льдов.

вмерзают в лед. При наблюдении с самолета весной можно видеть темные пятна на ледовых полях — скопления осадочного вещества. При таянии летом следующего года происходит новое перераспределение осадочного вещества — новой порции эолового материала и прошлогодней порции с их совместным осаждением в самых глубоких частях снежниц.

Поскольку намерзание льда идет в море только снизу осенью и зимой, то к этому эоловому материалу прибавляется еще осадочный морской, сконцентрированный в подледном слое и захваченный при замерзании. И через год он оказывается на поверхности льда в снежницах вместе с эоловым материалом. За год стает около 30 см поверхностного слоя льда, а нарастает также около 30—50 см. Это второй тип ледового насоса с забором осадочного вещества не с верхней поверхности обогащенной аэрозолями, а с нижней кромки льда. Они, как отмечалось, смешиваются с эоловым осадочным веществом в снежницах.

Полярники отмечают, что на выходе потока льдов из Северного Ледовитого океана через прол. Фрама льды в общем становятся более темными, на них чаще прослеживаются темные пятна осадочного

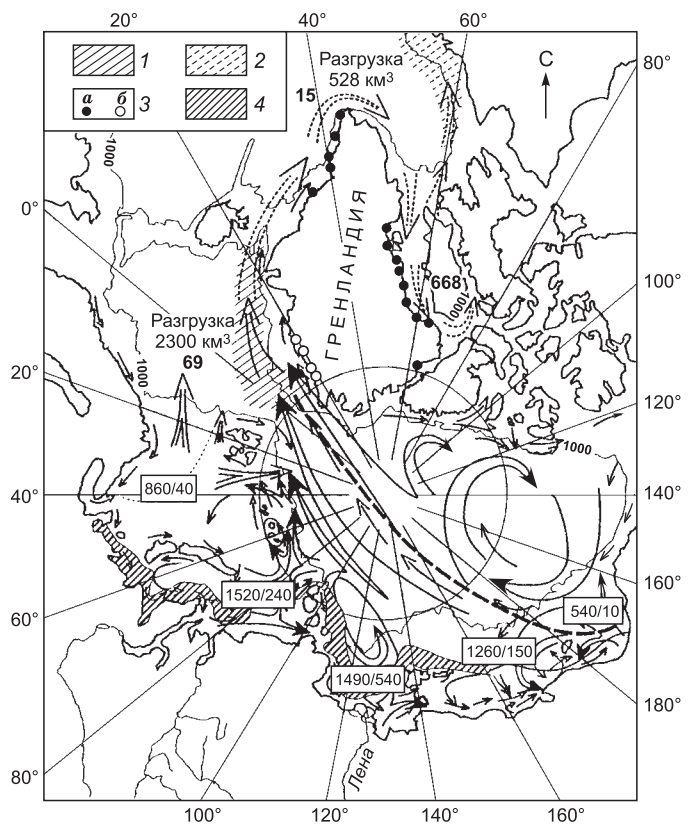
Рис. 10. Главные направления дрейфа льдов и захваченного льдами (и снегом) осадочного материала.

Горизонтальные потоки ледового осадочного вещества, области захвата, динамика переноса и области главной разгрузки, криодепоцентры (фронты встречи с теплыми течениями) [Лисицын, 2001а; Lisitzin, 2002].

1 — зоны разгрузки, бассейны и криодепоцентры ледовой седиментации; 2 — области у берегов Гренландии, где льды пополняются айсбергами; 3 — главные области поступления айсбергов (а) и второстепенные (б); 4 — зоны развития припая (захват осадков мелководья) и заприпайных полей.

Стрелки — траектории главных ледовых потоков, пунктирные — потоки осадочного вещества айсбергов. Штриховая линия — главный ледораздел СЛО — разделение потоков осадочного материала Евразии от осадочного материала Сев. Америки.

Цифры в прямоугольниках: объем льдов (км³), первая цифра — в конце зимы, вторая — вынос льдов (и осадочного вещества с льдами) из моря в Центральную Арктику. Цифры в криодепоцентрах: объем ежегодно тающих льдов в депоцентре (км³/год), полуширные — поставка с ледового и айсбергового осадочного материала (млн т/год).



вещества бывших снежинок, а по составу загрязнений в ядрах бурения льда и другим индикаторам прослеживается влияние эолового вещества и подледного морского планктона.

Средняя скорость дрейфа льдов в евразийской части Арктики составляет около 10 км/сут, т.е. это средняя скорость горизонтальных потоков рассеянного осадочного вещества ледового переноса. Однако движение льдов идет по сложным кривым с остановками и завихрениями. В Канадской котловине существует круговорот, который подтверждается наблюдениями со спутников, и льды находятся в нем до 10—15 лет, что подтверждено многолетними наблюдениями дрейфующей станции Канады на ледовом острове-айсберге (см. рис. 2, Б).

Итак, поток осадочного материала со льдами Арктики достаточно разнообразен по генезису: захват из прибрежной зоны (особенно значительный в приливных морях — Охотское, Берингово), дополнительный захват речных осадков, вмержших в лед при катастрофических наводнениях, работа ледовых насосов в заприпайных польнях зимой и при наращивании многолетних льдов осенью (рис. 10).

Приведенных здесь далеко не полных данных достаточно, чтобы понять, что ледовая седиментация в Арктике — это многообразный и сложный процесс больших масштабов. Здесь возникает осадочный материал с особым составом и свойствами [Лисицын, 1951, 1958, 1961б, 1966, 1994а; Лисицын, Чернышова, 1970; Lisitzin, 2002; Лисицын и др., 2004а,б].

Дальность переноса осадочного вещества (рассеянного тонкого и песчано-алевритового, и грубо-обломочного) очень значительная, она может превышать 1000—3000 км от мест формирования до мест накопления.

Разгрузка ледовых полей от осадочного вещества идет по-разному для однолетних и многолетних льдов. Для однолетних льдов главное значение имеет весеннее таяние по внешней кромке льдов по мере ее продвижения к северу от берегов до границы паковых льдов. Здесь возникает комплекс явлений MIZ (Marginal Ice Zone) — появление линзы талой пресной воды с биогенными элементами, смешение с морской водой (условия плавучего эстуария), повышение первичной продукции за счет биогенов этой воды, которое отмечается на протяжении короткого времени. Происходит «ковровая» разгрузка всех видов осадочного материала однолетних (и части речных) льдов, которая завершается осенью с наступлением холодов. Разгрузка летом имеет место по всему фронту таяния от берегов до кромки паковых льдов.

Иначе идет главная разгрузка паковых льдов (и айсбергов). Их таяние наблюдается по границе теплых вод (температура от 0 до 1—2 °С и выше) южнее прол. Фрама (в Атлантике) и в зоне встречи течений Куроиси и Ойяиси (в с.-з. части Тихого океана). Здесь таяние происходит не только летом, но круглый год, даже во время полярной ночи. Здесь возникают уникальные депоцентры и бассейны седиментации ледового осадочного материала, пока изученные недостаточно. При похолоданиях ледникового времени эти криодепоцентры смещаются к югу, при потеплениях — к северу, что устанавливается при кросс-корреляции разрезов донных осадков и ледовых кернов бурения Гренландии.

Таким образом, удается выделить, по крайней мере, две группы рассеянного ледового осадочного вещества, отличающегося по генезису, составу и распределению: 1 — осадочное вещество и процессы, связанные с однолетним льдом; 2 — осадочное вещество, связанное с многолетним льдом.

К группе однолетних, кроме морских, относятся также речные, припайные и заприпайные льды, которые по определению существуют не более года. Для них характерно большое разнообразие осадочного вещества — от тонкого (фрагильный лед полыней и подледный планктон) до песчано-алевритового (особенно речные льды) и гравийно-галечного береговой зоны и мелководий (особенно в приливных морях) с периодическим отрывом вмержшего в лед материала (например, Охотское и Берингово моря, Мезенский залив и др.). Для осадочного вещества этой группы особенно характерны окатанная галька, остатки организмов бентоса литорали, а также планктона пресных и распресненных вод, остатки древесины, споры и пыльца наземных растений. Области их накопления обширные, без выраженных депоцентров, соответствуют ковровой разгрузке однолетних льдов. Положение северной границы зависит от изменений климата (при похолодании она смещается к югу).

Многолетние льды отличаются тонкостью частиц, поскольку формируются обычно вдали от берегов. Важное значение имеет многолетнее смешение эолового материала (и загрязнений) с взвесью и остатками фитопланктона из подледного слоя. Бентос и крупный обломочный материал отсутствуют (в том числе бентические фораминиферы), встречаются (редко) микроводоросли снежниц. Многолетнее существование приводит к большой дальности переноса осадочного вещества потоком таких льдов по поверхности. Разгрузка потока идет при встрече ледовых полей с теплыми (от 0 до +2 °С и более) поверхностными водами, таяние сконцентрировано по линии фронта, круглогодичное с образованием на дне криодепоцентров, сложенных в основном пелитами. Крупнейшие современные криодепоцентры: 1) в южной части прол. Фрама, в месте встречи потока льда с теплым Северо-Атлантическим течением (см. рис. 10); 2) в месте встречи холодного течения Ойясио с теплыми водами Куроисио — в северо-западной части Тихого океана. Перемещение депоцентров во времени отвечает изменениям климата.

ОБРАЗОВАНИЕ АУТИГЕННОГО (БИОГЕННОГО) ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА: ЭКСПОРТ — ПРОДУКЦИЯ, БИОФИЛЬТРЫ (1—3), РЕЦИКЛИНГ, ПОТОКИ ПЕЛЛЕТОВ И НЕФЕЛОИДЫ

В ходе биогенных процессов вдали от суши возникает большая группа разнообразных по минеральному составу и морфологии биогенных (автохтонных) компонентов рассеянного осадочного вещества, которые объединяются литологами в биогенную триаду ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 + 2\text{C}_{\text{орг.}}$). Другая часть биогенного вещества поставляется из атмосферы (споры и пыльца, волокна наземных растений и др.), из рек, со льдами, из других источников.

Прямые исследования рассеянного вещества, проведенные нами на материале всех геосфер Арктики (атмо-, крио-, гидросферы) и в донных осадках, показали, что биогенных осадков в Арктике в настоящее время не накапливается, это область уникальной терригенной ледовой седиментации. Биогенный

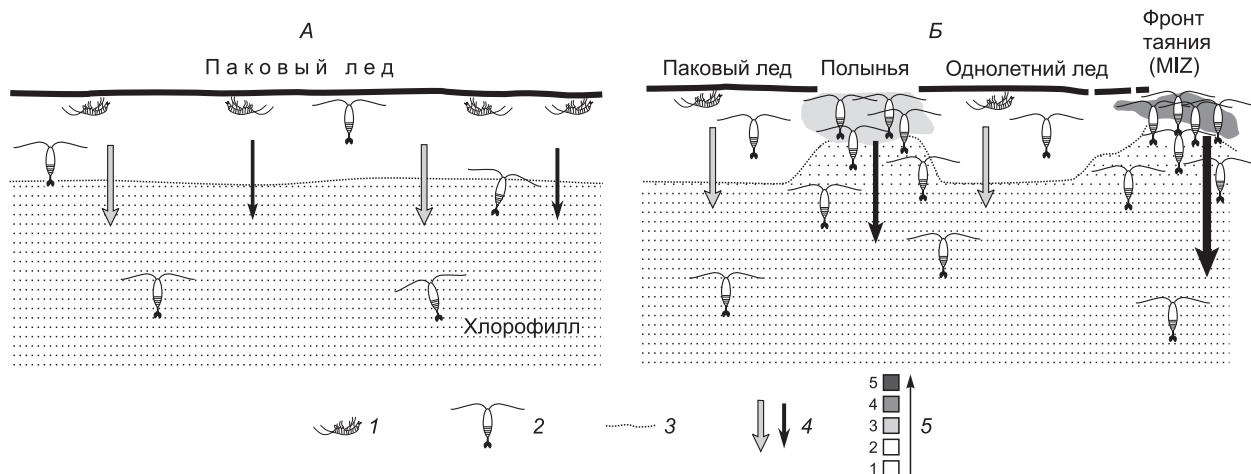
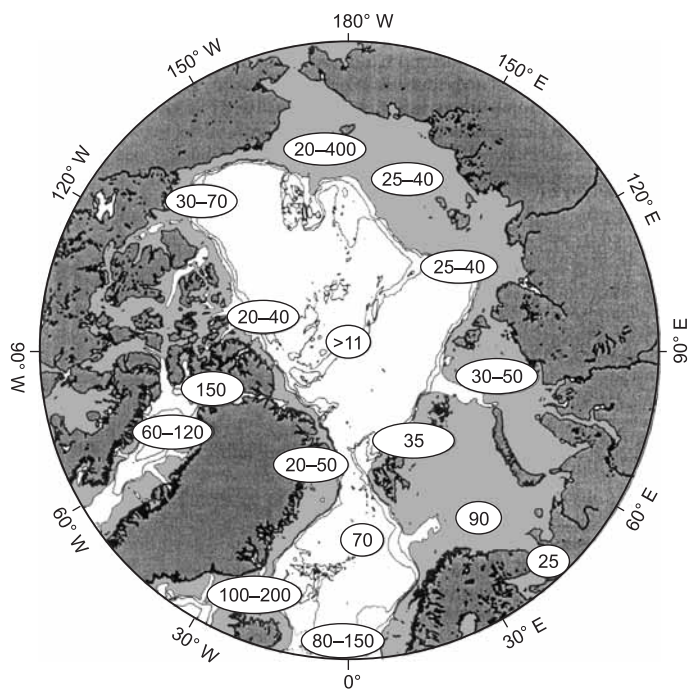


Рис. 11. Планктон под покровом снега и льдов в Центральной Арктике — зимой (А) и летом (Б) [Wadhams, 2000].

1 — подледный планктон; 2 — зоопланктон в водной толще; 3 — слой перемешивания; 4 — поток биогенного материала; 5 — относительное содержание хлорофилла в воде (по пятибалльной шкале: 1 — очень низкое, 5 — очень высокое). Круглый год содержание хлорофилла подо льдом очень низкое. Летом фотосинтез развивается по временным полыньям (содержание хлорофилла среднее, редко — высокое), а также в краевой зоне таяния льдов (MIZ) — высокое и очень высокое. Скопления фильтраторов зоопланктона определяются фитопланктоном, так же как и пеллетные потоки (черные большие стрелки).

Рис. 12. Первичная (тотальная) продукция фитопланктона (мгС/м²/год) в Северном Ледовитом океане (данные [Ведерникова и др., 1994; Sakshaug, 2004]).

Минимальные значения в области паковых льдов. Максимальные — в областях влияния вод Атлантики и Тихого океана.



материал встречается обычно в виде примесей (менее 10 % от осадка) и лишь в отдельных местах (особенно в областях влияния вод Атлантики и Тихого океана) появляются заметные количества кремнистых и карбонатных осадков. Вклад биогенного вещества в донные осадки в областях ледового седиментогенеза минимален, что неоднократно отмечалось [Лисицын, 1978, 1994a].

Другая важнейшая роль биогенных процессов, которые сосредоточены в верхних деятельных слоях океана, состоит в образовании рассеянного в клетках фитопланктона органического вещества в процессе фотосинтеза (рис. 11). Организмы фитопланктона можно сравнить с кремниевыми солнечными батареями для получения энергии. Энергия фотосинтеза накапливается в виде органического вещества фитопланктона и количественно характеризуется величиной первичной продукции (и может быть выражена в единицах тепла или мощности) (рис. 12).

Прямые исследования взвеси из деятельного слоя показывают, что наряду с живыми клетками, здесь большое значение имеют также отмершие остатки микроводорослей (биокожное вещество океана), которые быстро минерализуются. Значительная часть биогенных и биофильных элементов, необходимых для фотосинтеза, возвращается при этом в воду (процесс рециклинга) и далее снова используется новыми поколениями фитопланктона [Виноградов, Шушкина, 2001; Ведерников и др., 1994].

Фотосинтез — это не только главный способ получения исходной пищи для всех организмов океана (первопища), но и создание $C_{орг.}$ — главного источника энергии для всех геохимических превращений элементов в толще вод и донных осадков. Осаждение мелких частиц органики на большие глубины (4—5 км) через толщу вод, т.е. в окислительной среде, в «живом океане» (в водах с большим количеством бактерий и других организмов), удалось за последние годы детально изучить не на основе, как обычно, анализа конечного продукта — донных осадков, а инситу в водной толще на разных глубинах с помощью седиментационных ловушек, изучения водной взвеси и потоков органического вещества.

Удалось установить в водной толще по вертикали горизонты концентрации органического вещества: 1 — деятельный слой, над пикноклином на рис. 13 слои 1—2, пикноклин —3; 2 — нефелоидные слои в толще вод (в особенности бионефелоиды), на рис. 13 слой 4; 3 — самый верхний слой донных осадков, где идет превращение водной взвеси в донный осадок (область ступенчатого рассеянного осадочного вещества — слой 5 на рис. 13).

В целом больших глубин океанов достигает менее 1% от первичной продукции, т.е. от $C_{орг.}$, образованного в деятельном слое в ходе фотосинтеза [Леин и др., 1996, 2006; Романкевич, Ветров, 2001]. Эта закономерность общая для всего Мирового океана, однако в Арктике суровые для жизни условия достигают своих крайних проявлений. Здесь, напомним, сочетаются явления полярной ночи, когда фотосинтез исключается полностью, с кратким полярным летом, когда поверхность частично или полностью покрыта льдами и снегом, а небо покрыто облаками, с условиями почти отрицательных круглогодичных температур и резким дефицитом необходимых для фотосинтеза биогенных элементов.

И тем не менее жизнь здесь поддерживается не только в деятельном слое, но и на глубинах в тысячи метров, куда пригодная для жизни органика проникает только благодаря работе организмов-фильтраторов (копелоды, реже другие организмы мезопланктона) [Виноградов, Лисицын, 1981; Лисицын, Виноградов, 1982; Лисицын, 2001а,б, 2004, 2009].

Извлечение необходимой пищи, рассеянной в воде в виде тонкой взвеси, эти организмы производят с помощью специальных фильтровальных устройств, причем фильтрация идет безвыборочно (кроме питательных веществ захватывается также и минеральный балласт). Взвесь при этом используется лишь частично (на 40—60 %), Диспергированная пища-взвесь упаковывается организмами-фильтраторами в

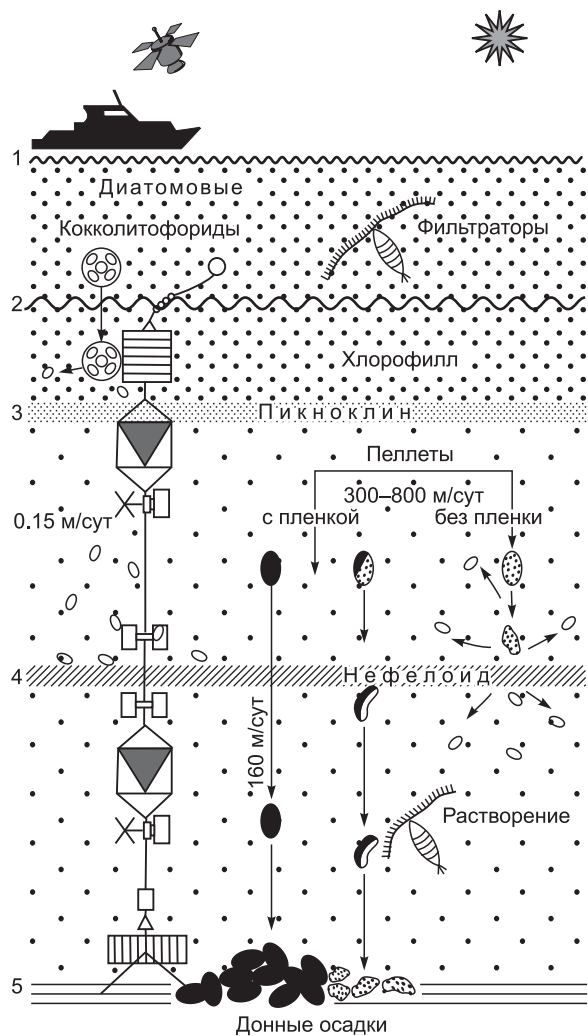


Рис. 13. Принципиальная схема осаждения рассеянного осадочного вещества в толще вод океана и биогенной седиментации.

1 — поверхностный (спутниковый) слой; 2 — нижняя часть спутникового слоя; 3 — слой скачка плотности морской воды (пикноклин) — нижняя граница деятельного слоя — области фотосинтеза (работа солнечных батарей океана); 4 — нефелоид; 5 — донные осадки. Главную роль синтеза ОВ играют диатомовые водоросли, динофлагелляты и кокколитофориды. Они служат пищей более крупным биофильтраторам зоопланктона (копеподы, эуфаузииды, сальпы и др.). Они концентрируют мелкий детрит в крупные пеллеты, что приводит к ускорению осаждения частиц в контейнерах в десятки—сотни раз. На больших глубинах в первую очередь распадаются мелкие пеллеты и пеллеты без защитных пленок. Окончательный распад пеллет — на дне под действием бактерий. Слева — притопленная станция с седиментационными ловушками и гидрологическими вертушками. Конические 12-стаканные ловушки автоматически отбирают накопившуюся в конусе пробу и фиксируют ее.

пеллетные комки, защищенные от влияния морских вод защитной оболочкой — пеллицелем. Эти комки-пеллеты опускаются на дно со скоростью в десятки раз большей, чем отдельные микродетритные частицы, образуя вертикальные потоки пеллетов. Эти процессы удалось изучить инситу при совместных работах с биологами. Микродетритная часть вне пеллетов быстро растворяется, и этот рециклинг элементов особенно быстро идет в верхних сотнях метров водной толщи, а в пеллетах-контейнерах сохраняется.

Органика, проникающая на большие глубины и вызывающая диагенетические процессы в донных осадках, — это в основном пеллетная органика. Она освобождается от оболочек бактериями уже в верхних слоях осадков, что также удалось изучить инситу.

Таким образом, на примере исследований в Арктике и особенно в Белом и Карском морях изучена работа нескольких механизмов биофильтрации, имеющих важное значение для всей природы океана: 1) биофильтрация организмами фитопланктона в ходе фотосинтеза (отделение биогенных и биофильных элементов от взвешенных частиц) — это работа биофильтра-1 (БФ-1); 2) биофильтрация организмами зоопланктона с образованием пеллетных микроконтейнеров, обеспечивающих быструю транспортировку на дно не только биогенного, но также и минерального вещества — БФ-2 [Петипа, 1981; Лисицын, 2008, 2009].

Остатки органики используются организмами бентоса-фильтраторами (БФ-3), собирателями с поверхности (из слоя перехода взвеси в донный осадок) и, наконец, илоедами. В этой последовательной цепочке организмы используют все более стойкие формы органики. Заключительную часть работы проводят бактерии уже в восстановленных слоях осадков до нижней границы биосферы.

Биологические процессы почти не проявляются в составе донных осадков Арктики — содержание биогенного вещества очень редко достигает 10 % (в основном в зоне влияния атлантических и тихоокеанских вод). Обычно биогенная часть составляет здесь 1—3 % и <1 %. Прямое изучение потоков показывает, что биогенный материал продуцируется, но в очень ограниченных количествах. Об этом же говорят данные о мощности верхнего окисленного слоя осадков.

ПОТОКИ РАССЕЯННОГО ОСАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ТОЛЩЕ МОРСКИХ ВОД АРКТИКИ: ПРЯМЫЕ ЧЕТЫРЕХМЕРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОТОКОВ (мг/м²/сут)

Осадочный материал в верхнем деятельном слое океана оказывается в поле плотности морской воды и в поле течений. Главная часть этого осадочного вещества обычно связана с фитопланктоном, т.е. с разнообразными организмами, имеющими важнейшее значение для осадкообразования. Организмы фитопланктона объединяются тем, что не могут свободно передвигаться и как бы парят в водной толще, освещенной солнцем. Их плотность соответствует плотности морской воды.

Плотность верхнего слоя вод меняется в зависимости от климатической зональности, а также от сезонов года. Для высоких широт она меняется особенно значительно. Верхние воды отделены от глубинных слоев скачка плотности (пикноклином). В Арктике летнее положение пикноклина обеспечивает накопление на нем взвешенных частиц более легких (как при разделении проб осадков тяжелыми жидкостями). С замерзанием льда и выхолаживанием верхнего слоя градиент плотности снижается, и этот порог взвеси исчезает. Происходит сброс всего накопленного за весну—лето осадочного вещества на глубины — «зимний паводок взвеси». Чаще всего он совпадает с замерзанием льдов на поверхности и отжимом из них соляных растворов, которые (как и взвеси) имеют больший объемный вес, чем вмещающие воды, — это жидкая часть «зимнего паводка» в Арктике.

Явления зимнего глубинного паводка взвеси и потоков утяжеленной отжатыми рассолами воды объясняют новое, сравнительно недавно открытое явление «каскадинга» (стока тяжелых вод, утяжеленных рассолами и взвесью из пикноклина) на дно шельфа и далее на материковый склон. Такие явления были впервые отмечены на бровке континентального склона Антарктики (сначала по гидрологическим данным) и подтверждены А.П. Лисицыным (в 1950—1966 гг.) по взвеси во время работ в Беринговом море [Лисицын, 1966]. Далее они описаны для шельфов, а также для участков осеннего заглужения пикноклина [Филлюшкин, Алейник, 2004] и для шельфово-склоновой зоны океанов в целом [Шапино и др., 2000; Ivanov et al., 2004].

С точки зрения литологии этот один из важных, но пока слабо изученных способов перемещения осадочного вещества, причем особенно важный, уникальный для осадкообразования на континентальных склонах именно полярных морей. Это один из постоянных (ежегодных) источников питания глубинных контурных потоков на материковом склоне и формирования связанных с ними контуритов и дрифтов [Лукашин, 2008; и др.].

Замерзание морских льдов на поверхности, столь характерное для морей Арктики и Антарктики, таким образом, имеет своим следствием возникновение особых механизмов транспортировки: 1) дальней транспортировки осадочного материала льдами по поверхности моря (верхний поток криозолей) и 2) нижний поток транспортировки, связанный с рассолами (каскадинг, контуриты, дрифты). Нижний поток определяет среду седиментации и движение глубинных вод. Это и перемещение по вертикали или даже полное исчезновение пикноклина («жидкого дна»), на котором идет временное накопление взвеси, возникновение рассолов, отжимаемых при замерзании соленой морской воды, которые заполняют понижения рельефа, а также стекают (вместе с осадочным веществом) со склонов и дают начало формированию глубинных и придонных вод, заполняющих котловины Арктики и обеспечивающие их периодическую вентиляцию, а также пополняющие веществом контурные течения.

Для Центральной Арктики надежных определений содержаний взвеси в столбе морской воды пока мало. Наименьшие содержания отмечены в Канадской котловине, где они находятся в пределах 0.1—0.3 мг/л, т.е. относятся к минимальным для Мирового океана.

Снижение содержания взвеси в глубинных водах Центральной Арктики подтверждается также и определениями на «Полярштерне» (рейс ARK-XI-1 июль—сентябрь, 1995). Содержание взвеси в поверхностных водах здесь в обычных для центральной части СЛО пределах от 0.3 до 0.5 мг/л, а на глубине снижается до 0.1—0.2 мг/л.

В западной части Баренцева моря, в Норвежском море и в прол. Фрама, содержание взвеси на поверхности заметно выше за счет разноса и развития фитопланктона (влияние вод Атлантики).

В районе гибели ПОА «Комсомолец» (73° с.ш., 13° в.д.) на протяжении 6 лет наблюдений содержание взвеси на поверхности находилось в пределах 0.15—2.04 мг/л. С глубиной (под пикноклином) содержания быстро падают и на 300 м становятся почти постоянными до дна — в пределах около 0.3 мг/л. У дна обнаружен нефелоидный слой толщиной до 250 м, в котором мутность возрастает в 2—6 раз сравнительно с фоновыми значениями [Лукашин, 2008].

Итак, для количественного распределения взвешенного осадочного вещества, полученного на мембранных фильтрах в СЛО, могут быть установлены следующие закономерности:

1. Великие реки Сибири и р. Маккензи поставляют в океан огромные количества осадочного вещества, которое на 93—95 % задерживается в маргинальных фильтрах. За пределы изохалины 25 ‰ проникает только около 5 % от исходной речной взвеси. Это видно на серии разрезов распределения взвеси, проведенных от устьев рек на север, а также по данным гидрооптического зондирования. В устьях рек Сибири содержание взвеси обычно составляет в среднем для года десятки мг/л (20—60 мг/л) — среднее 36 мг/л, что намного ниже среднего значения для рек мира — около 460 мг/л. Только в период паводка, на протяжении нескольких суток, максимальные содержания взвеси в водах сибирских рек достигают 200—400 мг/л.

2. За пределами маргинальных фильтров на шельфе обычные содержания взвеси в верхнем слое морских вод (выше слоя скачка) 0.5—0.7 мг/л. Оно возрастает в слое скачка плотности, а затем — в придонном слое в связи с взмучиванием донных осадков (до 2—4 мг/л). Содержание взвеси в поверхност-

ном слое за пределами фильтров определяется главным образом развитием фитопланктона — возникают пятна повышенных до 1—2.5 мг/л содержаний, связанных с кратковременным цветением диатомовых водорослей.

3. На материковом склоне картина вертикального распределения взвешенного осадочного вещества в Арктике имеет уникальные особенности, которых нет вне ледовых зон (сходные особенности установлены только для ледовой зоны Антарктики). Картина распределения взвеси по вертикали, кроме обычных связей со слоем скачка, определяется здесь стоком тяжелых вод (обогащенных рассолами, возникающими при ледообразовании) вниз по склону. Прямых определений пока мало. Поэтому особый интерес представляют наблюдения за нефелоидным слоем в Беринговом море [Лисицын, 1966] и данные определения потоков с помощью ловушек на материковом склоне Баренцева моря в районе гибели подводной лодки «Комсомолец» (6 лет наблюдений) и парохода «Титаник» [Лукашин, 2008]. Это явление — возникновение глубинного нефелоидного слоя с высокими содержаниями взвеси и с резким ее отличием по составу от вышележащих и нижележащих слоев — связано со сбросом (каскадингом) осадочного вещества с шельфа. Явление каскадинга — регулярного сброса тонкого осадочного вещества с шельфа, его перемещение по шельфу в понижениях рельефа (подводные медленнотекущие реки осадочного вещества), явления паводка рассолов (при замерзании поверхности моря и при образовании внутриводного льда), концентрация в нефелоидных слоях и их распространение в соответствии с плотностью (по изопикническим поверхностям) — все это уникальные особенности зон ледового седиментогенеза, на которые ранее почти не обращалось внимания.

4. В пелагических частях Северного Ледовитого океана содержания осадочного вещества очень низкие по всему вертикальному разрезу — они, видимо, самые низкие в Мировом океане — 0.1—0.2 и меньше 0.1 мг/л. В олиготрофном Саргассовом море средние содержания взвеси выше, чем в Канадской котловине Арктики. Все это показывает, что по содержанию осадочного вещества моря Арктики и пелагиаль СЛО относятся к голодающим океанам — темпы поступления осадочного вещества здесь минимальные, несмотря на то, что все седиментосистемы здесь действуют — идет поставка воздушной, водной и ледовой взвеси, развиваются биогенные процессы. Высокоширотные (ледовые) условия среды сказываются на процессах осадкообразования на всех этапах процесса от подготовки и транспортировки осадочного вещества до его отложения на дне.

5. Еще одна особенность ледовых зон — резкая неравномерность в распределении взвеси на протяжении года (зима—лето), ее сезонность. Максимальные содержания отмечаются для короткого (2—3 мес.) полярного лета, когда сочетаются максимальный сброс осадочного вещества реками (паводок), цветение фитопланктона, а на открытой от льда поверхности морей развиваются волны, размывающие донные осадки и берега. Зимой (8—10 мес.) сток рек снижается в десятки раз, прекращается поставка биогенного материала, ледовый покров препятствует развитию волн и их воздействию на донные отложения — наступает годовой минимум в поставке осадочного вещества. В это время действуют иные механизмы — захват взвеси поверхностным и внутриводным льдом, возникновение плотностных рассолов и образование подводной дренажной системы, по которой идет перенос тяжелых вод и тонкой взвеси в общем направлении к бровке шельфа — материковому склону, образование осенне-зимних нефелоидов и каскадинга.

Весенняя вспышка цветения диатомовых в Арктике очень кратковременная (см. рис. 12), но резко выявляется в количестве и составе взвеси с поверхности. На это короткое время (10—15 сут) диатомовые становятся главной составляющей взвеси. Их поток, по определениям в седиментационных ловушках в желобе Святой Анны (80° с.ш.), достигает 2245.000 клеток/см²/сут. Преобладают *Thalassiosira*, *Chaetoceros*, в меньших количествах *Licmophora*, *Navicula*, *Amphora* [Шевченко и др., 1998]. В начале цветения планктона пеллетов зоопланктона в пробах из седиментационных ловушек нет, но они вскоре появляются в связи с развитием рачков-фильтраторов зоопланктона.

Господство диатомовых отражается и в пробах «морского снега» в ловушках, его хлопья наполнены диатомовыми. Процессы выедания диатомовых фильтраторами — отражаются и в потоках пеллетного материала из седиментационных ловушек. Диатомовые водоросли быстро исчерпывают лимит биогенов и в конце лета встречаются во взвеси лишь в отдельных экземплярах, начинается длительный (9—10 мес.) абиогенный сезон полного господства минеральной части взвеси.

К числу уникальных для ледовых зон проявлений сезонности можно отнести также явление «скользящего максимума» содержания взвешенного вещества, который располагается по кромке тающих льдов (зона MIZ). Этот максимум обеспечивается разгрузкой льдов от заключенного в них криогенного осадочного вещества, а также биогенов, которые трансформируются во взвесь при возникающем здесь цветении фитопланктона. Перемещение максимальных значений разгрузки льдов и цветения вод начинается весной от южных границ морей, где развивается таяние льдов, к крайним северным — приблизительно до материкового склона. В этой широкой зоне происходит разгрузка однолетних и речных льдов от осадочного вещества, т.е. работает особый сезонный механизм «ковровой» разгрузки.

Фронт разгрузки паковых льдов, так же как и однолетних, смещается от крайнего южного положения зимой (когда область развития паковых льдов дополняется полосой однолетних льдов) до крайнего северного положения (в сентябре), когда однолетние льды исчезают и фронт разгрузки находится на максимальном удалении от суши. Главная разгрузка паковых льдов идет в местах их встречи с теплыми (0° до +2 °С) водами — здесь таяние идет даже зимой в полярную ночь — возникает криодепоцентр.

ПЕРВЫЕ ИНСИТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНУЛОМЕТРИИ ОСАДОЧНОГО ВЕЩЕСТВА В ТОЛЩЕ ВОД МОРЕЙ АРКТИКИ: ПЛОЩАДЬ ПОВЕРХНОСТИ, ГРАНУЛОМЕТРИЯ И СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ, ПОТОКИ ФРАКЦИЙ

Представления о гранулометрическом составе взвешенных частиц и донных осадков до недавнего времени были связаны с анализом проб в лабораториях на суше с применением методов диспергирования — воздействием различных химических реагентов, ультразвука, а также иногда кипячения и др. Водный механический анализ проводится в пресной воде, в то время как среда природного морского осадка и взвеси соответствует электролиту — соленой морской воде. Можно сказать, что физико-химические условия анализа этих природных систем не отвечали естественным, что ставит под сомнение эти результаты.

В ходе работ по изучению взвеси и донных осадков нами был применен метод, коренным образом отличающийся от рекомендованного: анализ частиц проводился в условиях природной среды (инситный) без применения химического или физического воздействия на природную дисперсную систему. Анализ проводился в рейсе в реальной морской воде в пробах, полученных батометрами на различных глубинах, причем немедленно после получения и без воздействия каких-либо реактивов, растирания и др. Возможность изменений гранулометрии в ходе подъема проб с глубины контролировалась гидрооптическими методами.

Гранулометрический анализ проводился при реальной температуре глубинных вод, с помощью счетчика частиц Коултера. Часть анализов параллельно выполнялась на лазерном счетчике Малверн, а также рекомендованным гидравлическим методом В.П. Петелина [1967], [Кравчишина, 2007, 2009; Кравчишина и др., 2008].

По вертикали водного столба пробы отбирали прицельно (в ходе анализа данных предваряющего вертикального гидрофизического и гидрооптического зондирования), обычно параллельно с отбором проб на мембранную ультрафильтрацию. Таким образом, впервые удалось получить представление о реальной крупности частиц рассеянного в морской воде осадочного вещества и сопоставить закономерности его распределения с полученными одновременно с океанологическими характеристиками среды тех же горизонтов (гидрозондами и другими приборами) и с донными осадками.

Такие исследования выполнены в ходе наших работ почти во всех морях Арктики — в особенности в Белом, Баренцевом, Карском, Лаптевых, а также в Атлантическом и Тихом океанах (а для сопоставлений — в Черном и Каспийском морях, на Балтике). В целом это несколько тысяч проб, полученных единым методом, т.е. большой материал для сопоставлений с данными по взвеси и донным осадкам [Кравчишина, 2009].

Удалось проанализировать также и пробы взвеси из вертикальных потоков (собранных седиментационными ловушками), а также из сепарационных проб. Это исследование М.Л. Кравчишиной, продолжавшееся почти 10 лет и охватившее все части Мирового океана, особенно Арктику, дало возможность впервые обоснованно судить о гранулометрии рассеянного осадочного вещества — одного из главных показателей его свойств и гранулометрии потоков вещества в толще вод Арктики, в том числе и под ледовым покровом [Кравчишина, 2009]. По сути, это открытие реального гранулометрического состава взвеси, не искаженной пробоподготовкой.

Коснемся только самых общих выводов, полученных при инситном исследовании гранулометрии и важных для понимания осадочного процесса в Северном Ледовитом океане.

1. По гранулометрическому составу воды рек Арктики имеют более высокий медианный диаметр и худший коэффициент сортировки, чем воды морей Арктики, т.е. значительные изменения гранулометрии идут на границе река—море: морской осадочный материал лучше отсортирован и в общем тоньше, чем речной (в основном терригенный).

2. Все показания гранулометрического состава речной воды меняются по сезонам, а также под влиянием приливов. Весной содержание пелитов в р. Северная Двина достигает 87 %, причем главную роль играют глинистые минералы (до 90 % и более иллит), а среди тонкообломочных минералов господствуют кварц и полевой шпат. В сопоставлении с донными осадками шельфа Белого и Карского морей гранулометрический состав водной взвеси заметно тоньше.

3. Для взвеси открытых частей северных морей характерен двугорбый тип гранулометрических кривых. Первый горб соответствует грубому материалу (в основном биогенные частицы до 80 %), вто-

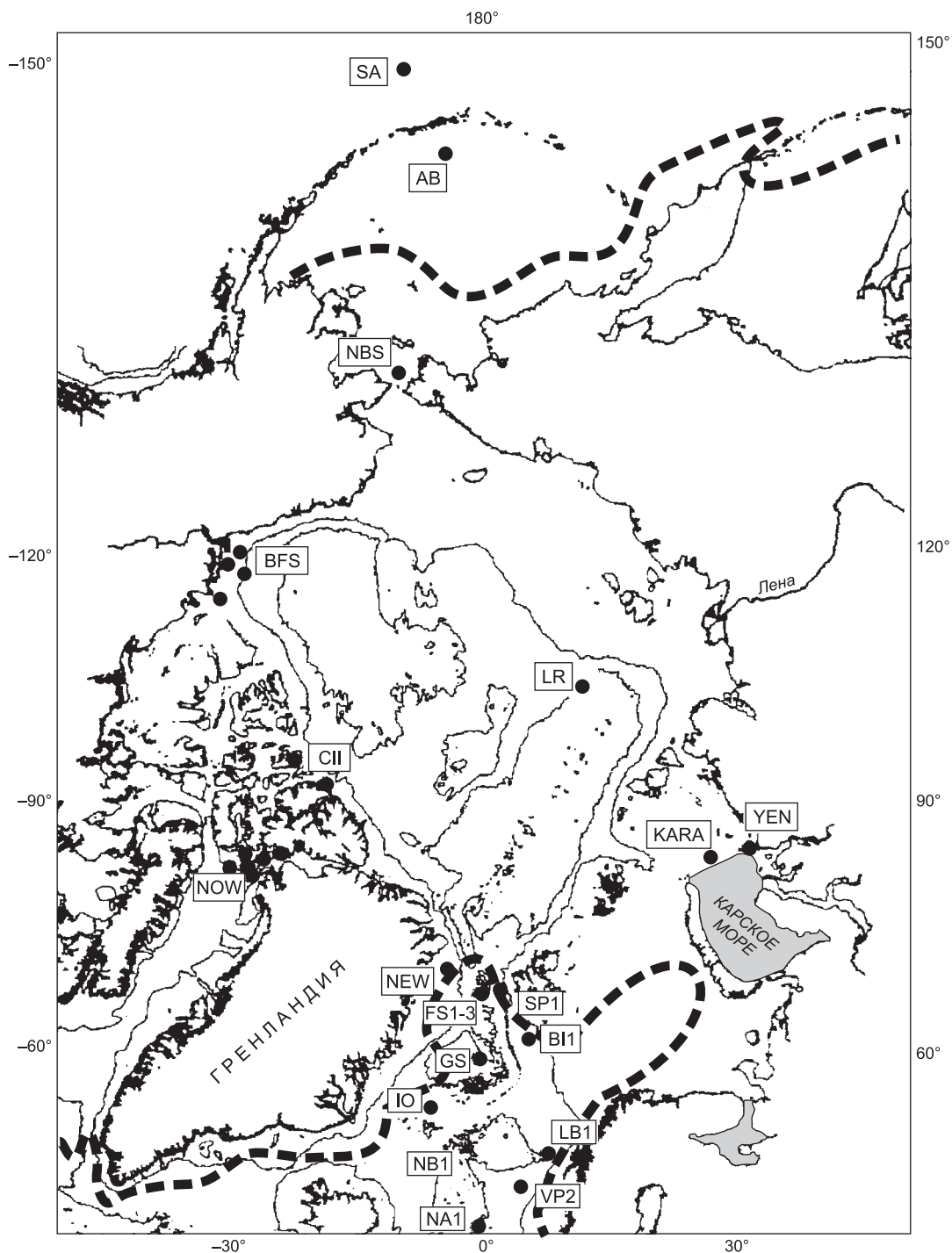


Рис. 14. Размещение притопленных платформ для круглогодичных исследований потоков взвешенного осадочного вещества (прямоугольники) и кратковременных осенне-летних исследований (Карское море).

рой — тонкодисперсному (глинистые минералы и биодетрит). Дефицит между ними отвечает фракции 5—6 мкм.

4. В зоне смешения река—море происходит закономерное изменение гранулометрического состава взвеси, что выражается как в соотношениях отдельных фракций, так и по медианному диаметру (M_d). На гравитационной ступени во взвеси р. Северная Двина M_d составляет 24—28 мкм, для сорбционной ступени 10—25 мкм, для заключительной — биологической резко растет до 25—60 мкм (панцири диатомовых и др.).

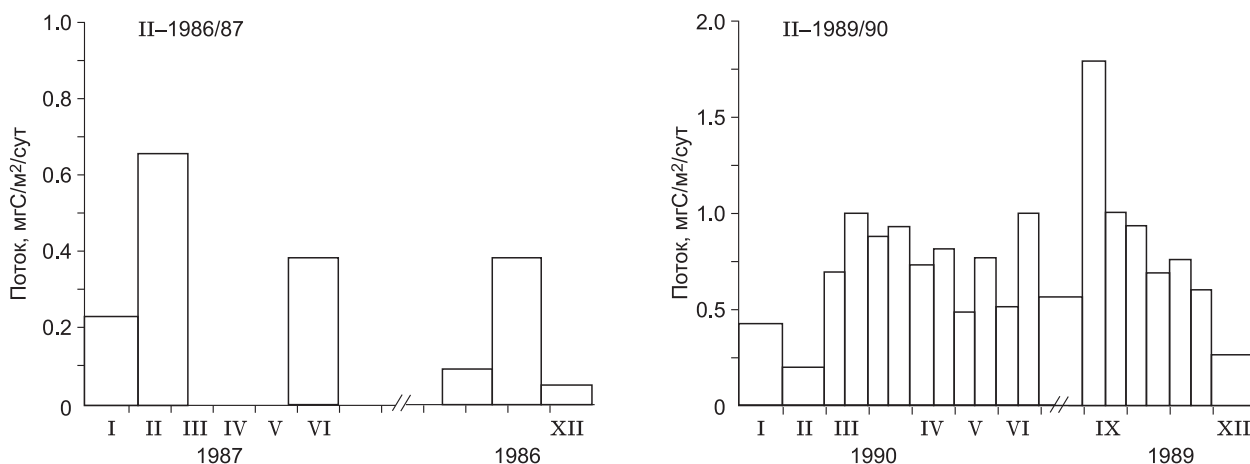


Рис. 15. Инситные измерения потоков $C_{орг}$ канадскими экспедициями в ходе дрейфа ледовых островов-айсбергов в 1986—1990 гг.

Ловушки устанавливали на глубине 100 м с экспозициями 30—60 сут [Hargrave et al., 1989, 1994; Hargrave, 2004].

5. Детальное изучение гранулометрии взвеси дает возможность определить площадь поверхности как отдельных фракций, так и взвеси в целом, т.е. определить сорбционную способность взвеси. Она оказалась максимальной на второй (коагуляционно-сорбционной) ступени маргинального фильтра (т.е. при солености 5—10 ‰).

6. В глубинных нефелоидных слоях, которые выделяются при гидрооптическом зондировании, обычно растет вклад фракции 10—20 мкм. В придонном слое четкая картина нарушается, что связано, по-видимому, с периодическим взмучиванием и неосаждением самых тонких частей осадочного вещества.

7. Применение счетчика частиц дает возможность определения полного объема этих частиц в 1 л воды, а с учетом их объемного веса — и общего содержания взвеси в 1 л. Такие регрессии (объем частиц/весовое содержание взвеси) показали возможность использования данных по гранулометрии (после пересчета) для определения общего содержания взвеси в воде (см. рис. 3). Более того, они показали, что «окно» в пределах которого ведется подсчет счетчиком Коултера, соответствует главной в весовом отношении части взвешенного в воде вещества, т.е. доля более крупных и более мелких частиц, которые оказались за пределами «окна», сравнительно невелика.

8. Пожалуй, одним из наиболее принципиальных выводов является то, что проводящиеся сейчас массовые анализы гранулометрии (водный механический анализ) с применением различных методов измельчения природных агрегатов и стяжений противоречит природной действительности. Эти агрегаты являющиеся порождением особенностями природной среды — например, пеллетные частицы планктонных и бентических организмов, бактериальные комки и стяжения. При использовании в водном механическом анализе пресной воды происходит нарушение коллоидно-дисперсной части, поскольку коллоидная система и взвеси, и донных осадков морей — это морская (соленая) коллоидная система.

Дальнейшая информация может быть получена из упомянутых в начале раздела работ.

Особенно интересные результаты удастся получить при одновременном исследовании концентраций осадочного вещества на вертикальных разрезах в разных частях Арктики, полученные фильтрацией, счетчиком Коултера с прямыми инситными определениями на притопленных платформах с ловушками осадочного вещества.

Каждая постанковка притопленной платформы, в особенности на круглый год, сопряжена в Арктике с большими трудностями, связанными с ледовым покровом, многие постанковки оканчиваются потерями приборов.

В настоящее время в Северном Ледовитом океане удалось изучить инситные потоки осадочного вещества немногим более чем в 20 точках (рис. 14), из них ни одна не дает полной характеристики потоков вещества в Центральном бассейне. Большинство связано с особыми условиями подводных хребтов (хр. Ломоносова), материковых склонов, шельфа и отдельных морей.

Больше всего круглогодичных постанковок на различных глубинах за 10 лет исследований удалось получить в Белом море (см. рис. 2, Г), эти данные будут рассмотрены в отдельном сообщении. В Карском море осенью 1993 г. проведены обширные исследования потоков в маргинальных фильтрах и прилежащих участках моря, а также в прол. Св. Анны [Шевченко, 1998; и др.].

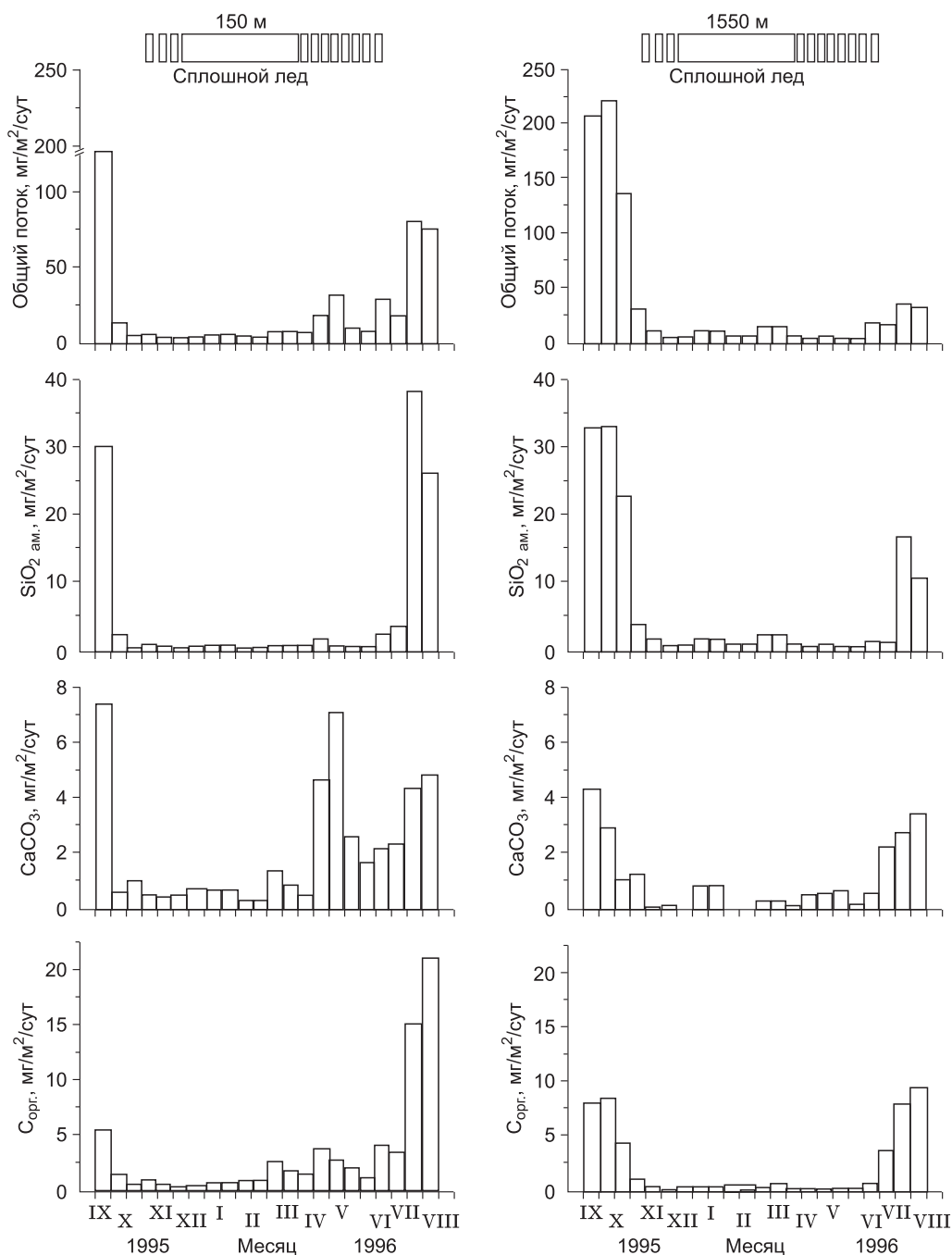


Рис. 16. Инситуные определения вертикальных потоков осадочного вещества в толще вод Центральной Арктики по данным седиментационных ловушек.

Уникальные данные из области круглогодичных (паковых) льдов с глубины 150 м и 1550 м [Fahl, Nöthig, 2007]. Вершина хр. Ломоносова (1703 м). Положение ст. LR см. рис. 14. Отбор проб по месяцам с сентября 1995 г. до августа 1996 г. Кроме суммарного потока осадочного вещества в пробах определены CaCO_3 , $\text{SiO}_{2\text{ам}}$, $\text{C}_{\text{орг}}$. Цветение ($\text{C}_{\text{орг}} + \text{SiO}_{2\text{ам}} + \text{CaCO}_3$) — в августе—сентябре. Максимальные значения потоков с июля по октябрь, т.е. во время полярного лета. Значения для верхней ловушки в пределах 75—130 $\text{мг/м}^2/\text{сут}$ и 40—225 для нижней. Для остальной части года характерны ничтожные потоки — менее 10 $\text{мг/м}^2/\text{сут}$. Осенью (сентябрь—октябрь) максимум авторы связывают со стоком р. Лена. По мнению автора, это замораживание полыней и отжим рассолов с взвесью при ледообразовании. Повышенные потоки в нижней ловушке объясняются особенностями придонного слоя. Вверху показана сплоченность паковых льдов.

Первые исследования потоков осадочного вещества в верхнем продуктивном слое провели канадские исследователи в 1988—1990 гг. (рис. 15) с дрейфующих айсбергов-островов. Трасса дрейфующей станции показана на рис. 2, Б. Из этих первых и достаточно случайных данных следует, что цветение в Центральной Арктике начинается под льдами в марте (очень слабое) и достигает максимума в сентябре

Рис. 17. Месячные вертикальные потоки осадочного материала ($\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$) в районе гибели АПЛ «Комсомолец», ст. 3325.

Отбор проб ежемесячный, ловушки на глубинах 1325 и 1692 м. Внизу — график прогрессивных месячных потоков для горизонта 15 м от дна (придонный слой), по [Лукашин, 2008].

(при максимальном разрежении льдов и сокращении снежного покрова). Поток $C_{\text{орг}}$ ($\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$) зимой меньше 0,5, возрастет в марте до 1,0 и достигает в сентябре 1988 г. максимума 1,8 $\text{мгС}/\text{м}^2/\text{сут}$. Отметим, что ловушки устанавливались в основном летом, зимой потоки приближались к нулевым значениям.

Большим достижением явилась постройка платформы с двумя ловушками (ст. LR см. рис. 14) на вершине подводного хр. Ломоносова недалеко от Северного полюса (рис. 16). Верхняя установлена на глубине 150 м — отражает экспорт-продукцию планктона, что подтверждается содержанием в веществе потока в основном биогенных компонентов ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + C_{\text{орг}}$). Максимум потоков всех компонентов здесь также приходится на сентябрь — разрежение льдов совпадает с хорошей освещенностью. Ловушка, установленная на 1550 м (около 150 м от дна), отражает влияние придонного слоя на вершине хребта — значения потоков здесь часто выше, чем в верхней ловушке. Обе ловушки четко показывают сезонность вертикальных потоков осадочного материала в Центральной Арктике. Главная часть года — полярная зима, когда потоки близки к нулевым значениям и только во время разрежения покрова паковых льдов возникает главный поток осадочного вещества на глубины — он продолжается всего около трех месяцев.

Седиментация на материковом слое Арктики отличается рядом особенностей. На глубинах здесь обнаруживается нефелоидный слой, соответствующий контурному течению; скорость и мутность в этом слое меняются во времени. Вторая особенность — зимний сброс рассолов с взвесью (каскадинг) во время замерзания льдов и отжимания рассолов. В ходе многолетних исследований района гибели АПЛ «Комсомолец» [Лукашин, 2008] удалось установить около 10 платформ с длительностью постановки по 10—20 сут, а также две годовые платформы с отбором проб один раз в месяц (рис. 17).

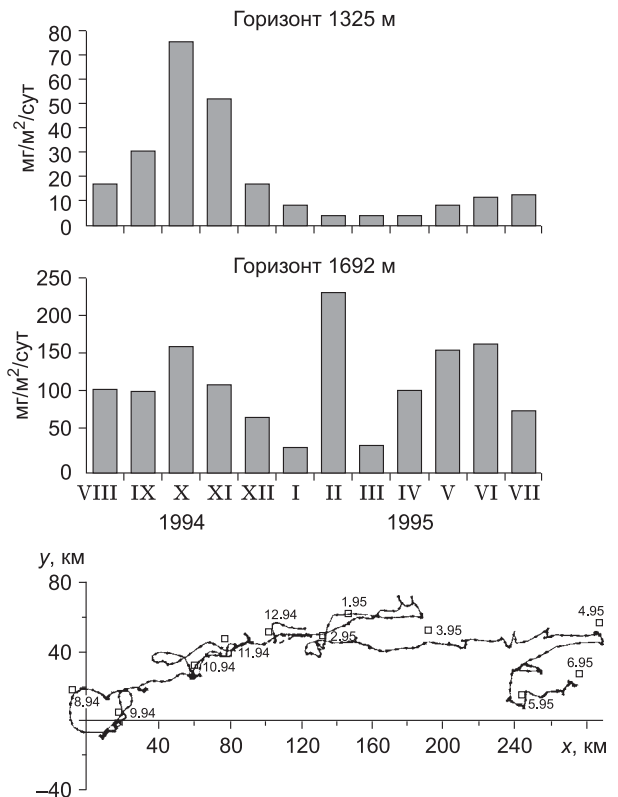
Для верхнего слоя (1325 м) характерен максимум в октябре, после чего, как и на хр. Ломоносова, идет резкое снижение потоков (меньше 5—10 $\text{мг}/\text{м}^2/\text{сут}$). Нижняя ловушка располагалась всего в 18 м от дна, т.е. отражает условия придонного слоя. Она находилась под нефелоидным (контуритным) слоем. Значение потоков здесь круглый год высокие с максимумом в феврале. Высокие значения перебиваются минимумами, связанными, очевидно, с ослаблением нефелоидного слоя.

Другая станция В-11 (см. рис. 14) была получена в августе 1984—1985 гг. [Honjo, Manganini, 1990] (немного севернее) на глубине 1700 м (соответствует по глубине нижней ловушке ст. Комсомолец) (рис. 18). Общий поток здесь в нижней части склона и здесь достигает максимума в январе—феврале, но сохраняются также и пики, связанные с цветением в июле—сентябре, что видно по потокам биогенных компонентов ($\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_{2\text{ам}} + 2C_{\text{орг}}$).

Изучение состава вещества потоков показывает, что главное значение имеет литогенный материал, и лишь во время цветения его роль снижается. Зимний максимум также наиболее выражен в потоке литогенного материала.

Очень интересен разрез с седиментационными станциями, сделанный поперек прол. Фрама, т.е. через область фронтальной разгрузки льдов в местах их встречи с теплыми течениями Северной Атлантики (рис. 19). Здесь удалось установить пять станций от мест постоянного ледового покрова у берегов Гренландии (1) до области разреженных льдов при холодных водах (2), две станции в области без льдов (3, 4) и в области (5) с разреженными тающими льдами (явление MIZ).

Как видно из этого разреза, главная часть осадочного материала, которая выносятся льдами из Северного Ледовитого океана через прол. Фрама — терригенная, ледовая. Хорошо виден также фронт разгрузки по границе теплых вод. Здесь идет образование криодепоцентра. По мере разрежения льдов



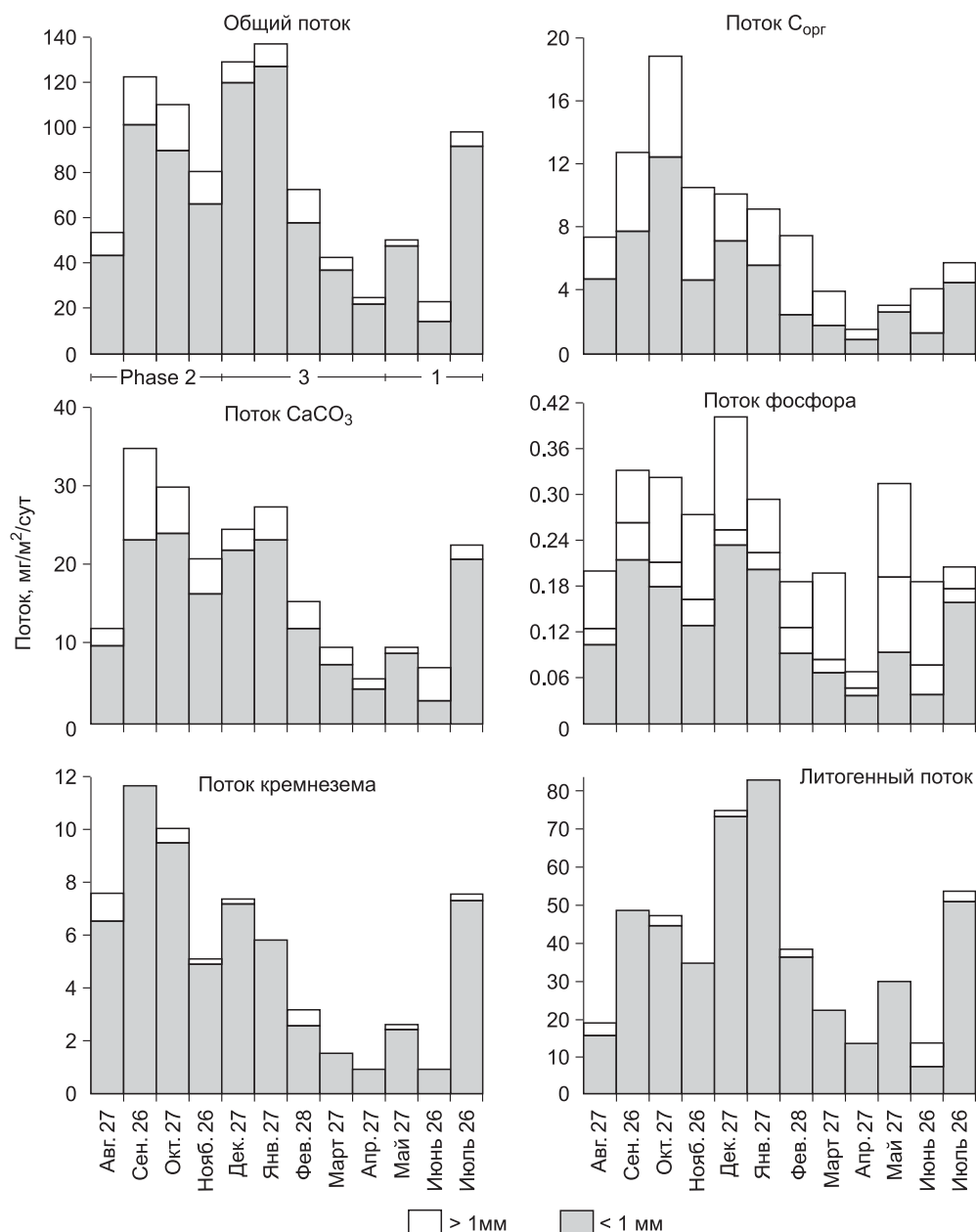
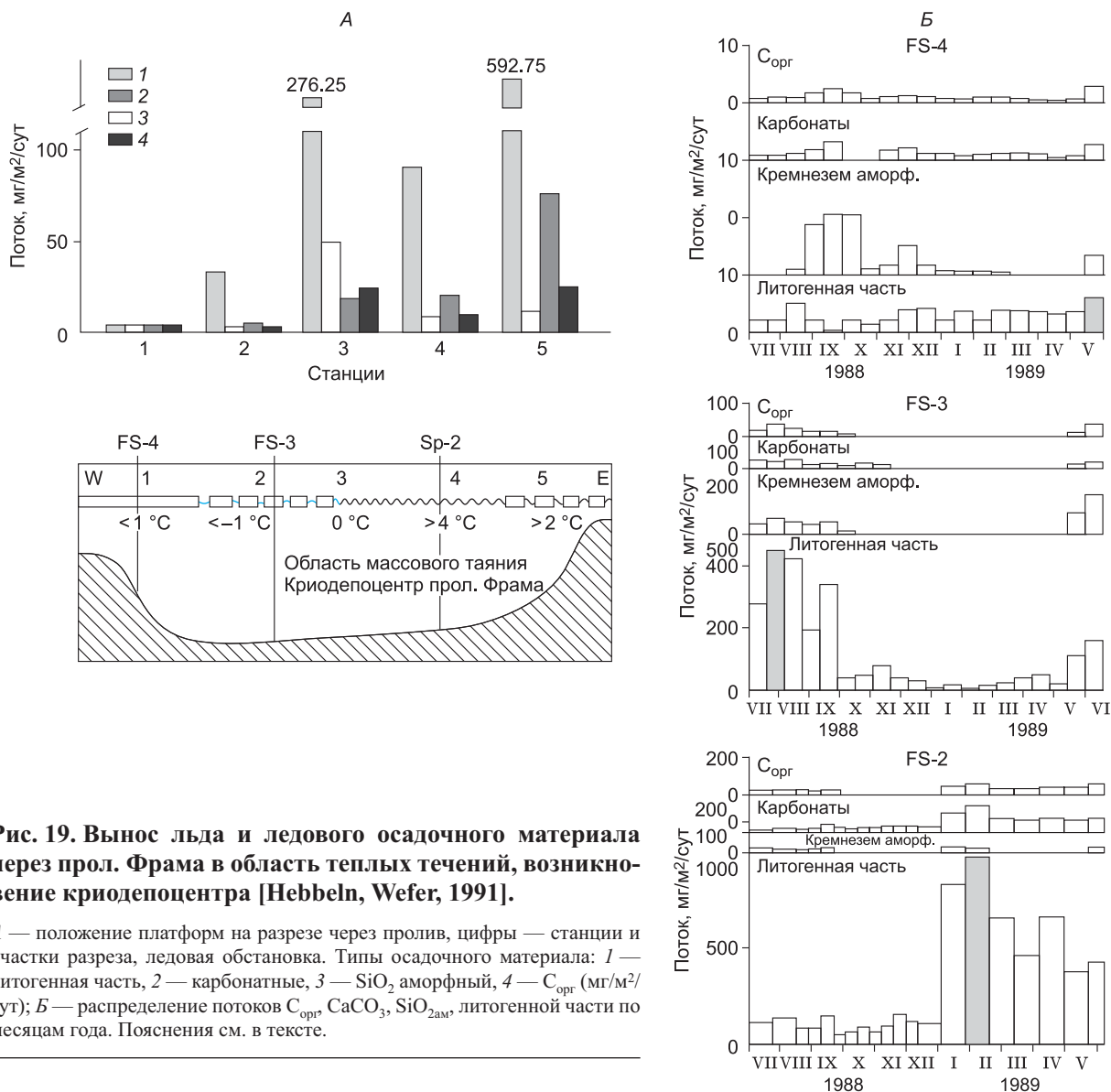


Рис. 18. Потoki осадочного вещества на ст. В-11 (материковый склон, севернее ст. 3325).

Годовая постанoвка (август 1984—август 1985 гг.). Выявляется сброс осадочного материала с шельфа на склон в начале зимы (декабрь—январь) [Honjo et al., 1990].

добавляется значение карбонатного и кремнистого биогенного материала, а также $C_{орг}$. На рис. 19, Б приведены детали этого исследования — потоки разных компонентов по месяцам, приведенные для основных станций (их положение см. на рис. 19, А). Видна характерная структура потока для льдов Центральной Арктики (ст. FS-4). Структура потока осадочного вещества, характерная для области таяния, видна на ст. FS-3 и, наконец, структура, характерная для континентальных склонов с максимумом в январе—феврале (FS-2).

Условия работы ледового насоса в заприпайных полыньях удалось наблюдать на серии станций в заливе Баффина в полынье Северная вода (рис. 20, положение см. на рис. 14). Ловушки размещались на глубинах от 200 до 510 м, определение потоков $C_{орг}$ в них указывает на летний максимум, особенно летом 1998 г. Затемнены части гистограммы для придонных (50 м от дна) ловушек, они показывают увеличение потоков в придонном слое.



Первые данные прямых инситу измерений потоков осадочного вещества и его важнейших компонентов в Северном Ледовитом океане позволили сделать следующие предварительные (число станций пока недостаточно) выводы об особенностях хода осадочного процесса.

1. Значения потоков осадочного вещества сильно меняются в зависимости от сезона (в соответствии с изменениями освещенности и ледовой обстановкой). Минимум приходится на полярную зиму, когда в сравнении с весенним максимумом потоки снижаются в несколько раз и приближаются к нулевым значениям.

2. В сравнении с потоками осадочного вещества в умеренных зонах, в маргинальных фильтрах рек Сибири потоки в Центральной Арктике в десятки раз ниже, а по составу в них резко преобладает тонкий (мельче 1 мм) минеральный осадочный материал.

3. Значения потоков зависят также от глубины (потоки на шельфах и потоки в пелагиали), от положения относительно континентального склона, по которому при замерзании льдов в Арктике, стекают потоки тяжелых, обогащенных рассолами вод (каскадинг). Своеобразно также распределение осадочного вещества по сезонам в толще вод над подводным хр. Ломоносова. Здесь цветение фитопланктона начинается только после разряжения ледового покрова — в июле—сентябре. С ноября до апреля — полярная зима с небольшим пиком карбонатов в апреле—мае.

4. Не касаясь многих интересных деталей, которые могут быть получены при рассмотрении рисунков, отметим, что реальные потоки осадочного вещества и его компонентов в Арктике, по данным инситу исследований, меняются очень значительно и зависят от сочетания многих факторов, т.е. картина далека от «гомогенного распределения вещества» и для пояснения всегда требует дополнительных исследований океанологической обстановки.

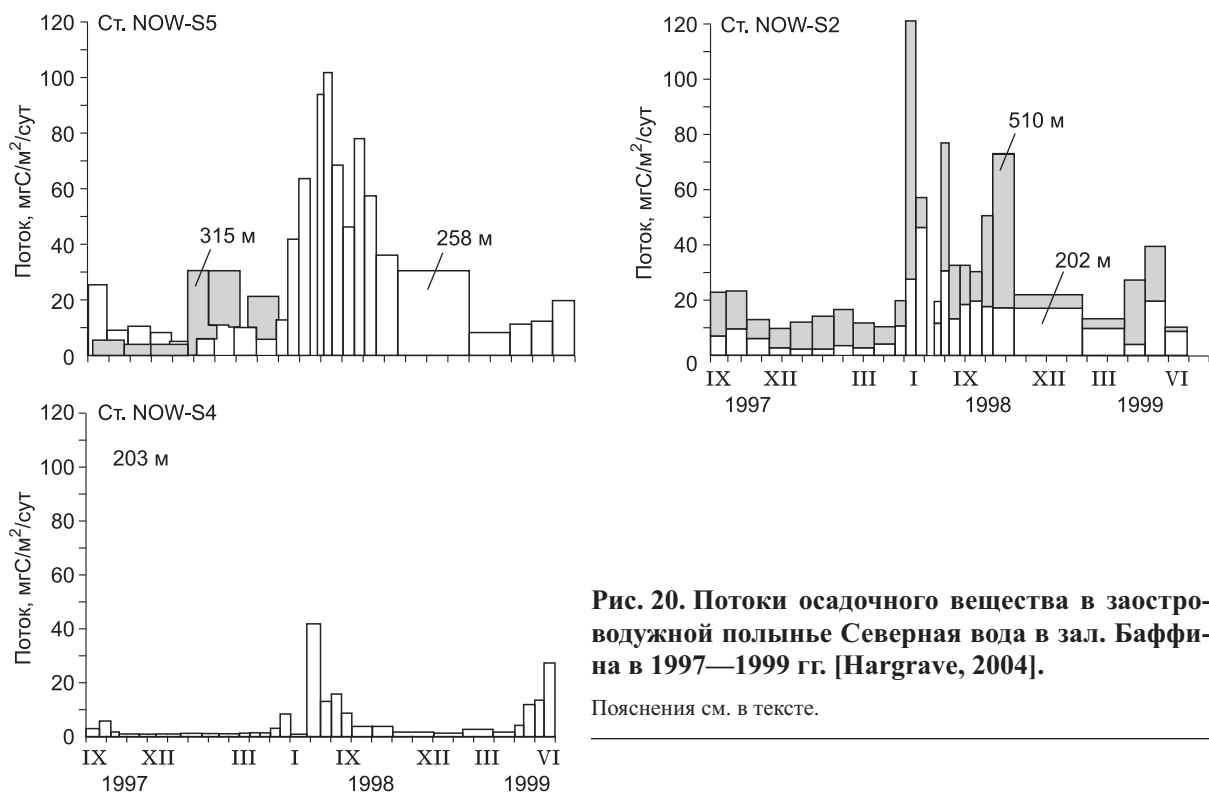


Рис. 20. Потoki осадочного вещества в заостроводужной полынне Северная вода в зал. Баффина в 1997—1999 гг. [Hargrave, 2004].

Пояснения см. в тексте.

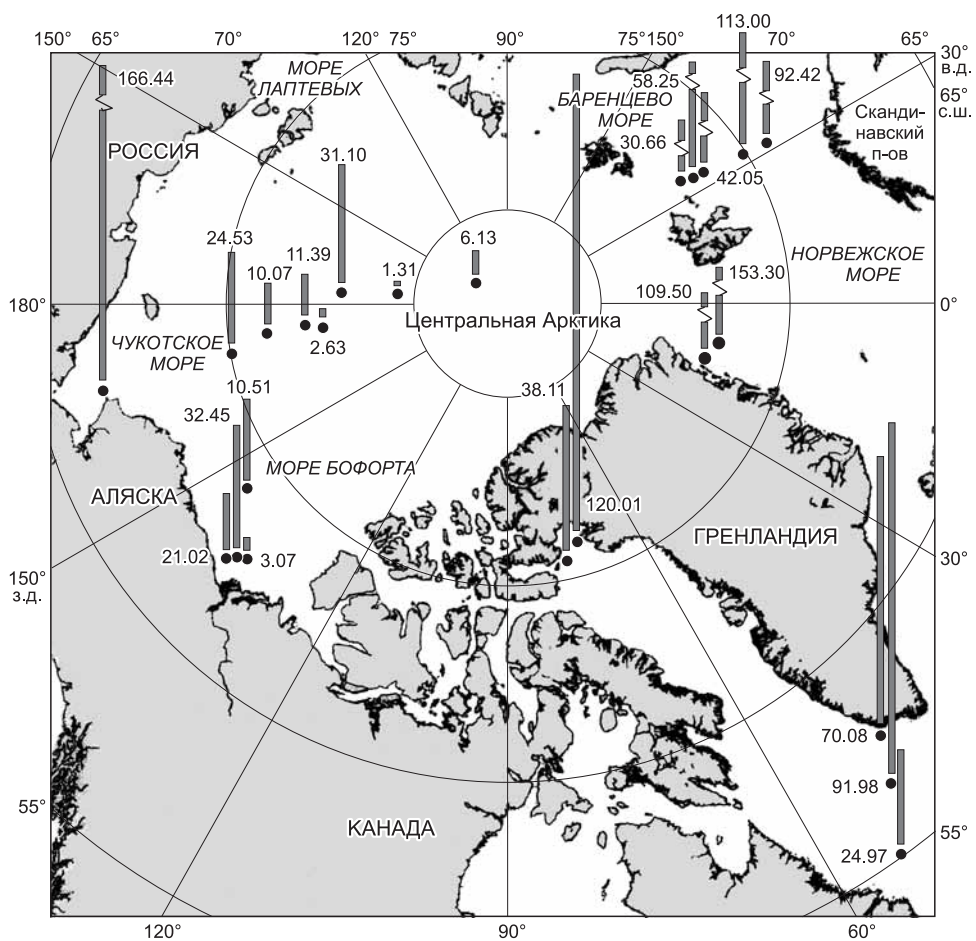


Рис. 21. Потoki $C_{орг}$ (гС/м²/год) в Арктике и Субарктике по данным ториевого метода ($^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$).

Уменьшение потоков в области паковых льдов по мере приближения к Северному полюсу. По данным разных авторов.

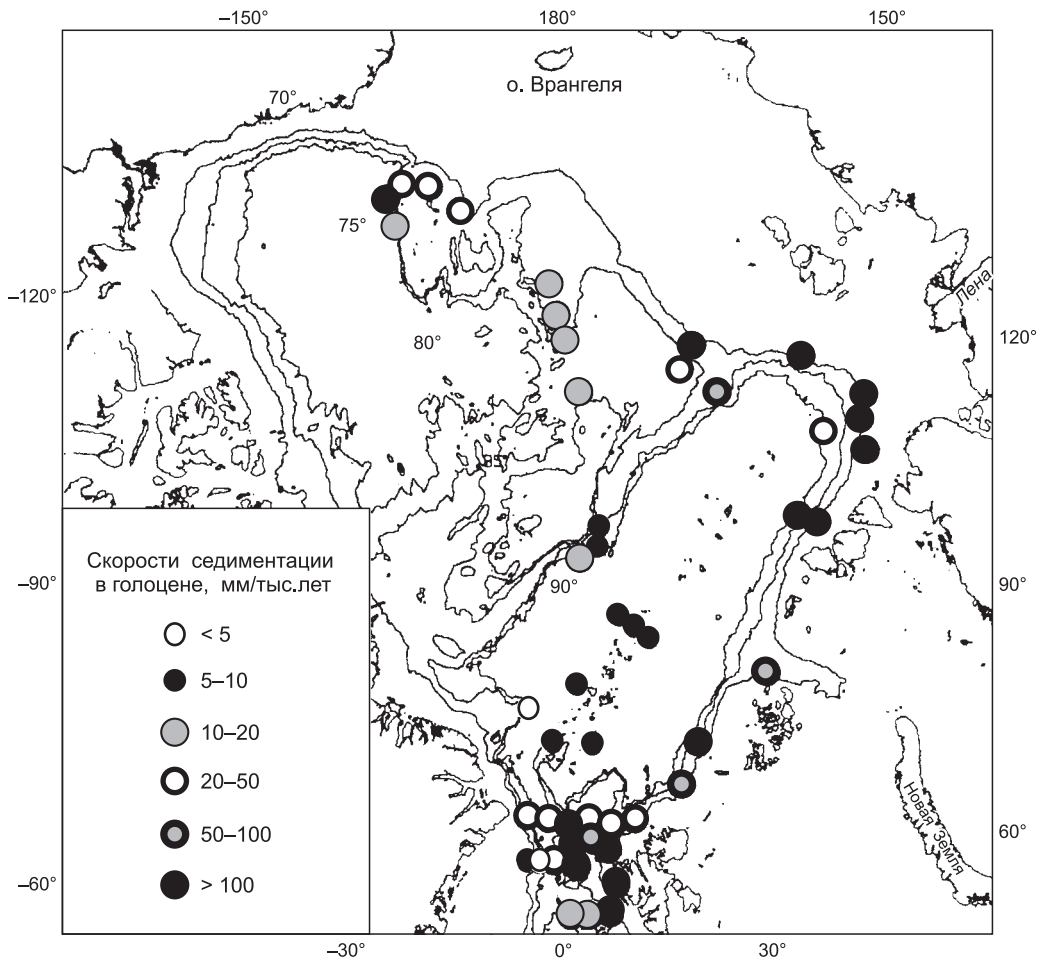


Рис. 22. Скорости накопления донных осадков в голоцене, Центральная Арктика.

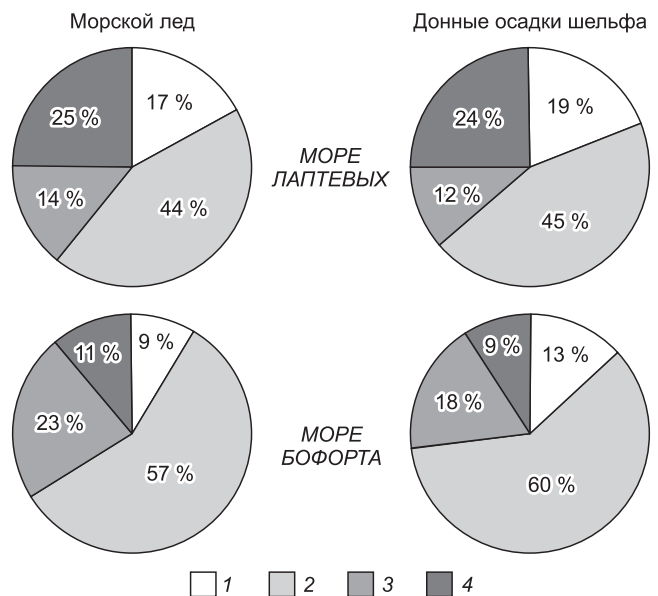
Максимальные значения (>100 мм/тыс. лет) — на шельфе и материковом склоне, минимальные (<5 мм/тыс. лет) — в глубоководных котловинах и на вершинах хребтов [Stein, 2008].

5. Независимые определения ториевым методом ($^{234}\text{Th}/^{210}\text{Pb}$) потоков для верхнего слоя вод (рис. 21) приводят к тем же заключениям о минимальных значениях потоков осадочного вещества в Центральной Арктике и их росте по мере удаления от паковых льдов и приближения к континентальному склону к шельфу. Это подтверждается также данными по определениям скоростей седиментации для самого верхнего слоя осадков (рис. 22).

Сопоставление минерального состава (глинистые минералы) морских льдов и донных осадков, сделанное для моря Лаптевых и для моря Бофорта (рис. 23), показали близкое сходство осадочного вещества льдов и донных осадков в морях Арктики, т.е. также указывают на ведущую роль морских льдов в зоне морского ледового седиментогенеза.

Рис. 23. Сопоставление состава глинистых минералов, извлеченных из морских льдов с поверхности моря, с составом минералов донных осадков шельфа с тех же участков дна моря Лаптевых и моря Бофорта [Reimnitz et al., 1998; Dethleff, 2005].

1 — смектит, 2 — иллит, 3 — хлорит, 4 — каолинит.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящее время удалось исследовать осадконакопление во всех частях Мирового океана, включая высокие широты, т.е. выяснить, действительно ли 71 % поверхности Земли, покрытой морем, и соответствующий ей осадочный процесс гомогенизированной, и что это особый (по Н.М. Страхову [1993] нормально-осадочный процесс — и, наконец, что эта особенность может служить основой теории современного глобального литогенеза.

2. За последние годы значительные работы проведены также в высокоширотных частях океана (Арктика и Антарктика), что дало материал для сопоставлений проходящих здесь процессов с ранее изученными областями умеренной, тропической и экваториальной зон.

Эти сравнительно-литологические исследования проводились нами много лет по единой программе и методике, которая совершенствовалась с годами [Лисицын, 1966, 1974, 1987; Lisitzin, 2002]. Методика исследований во многом отличалась от традиционной. В частности, кроме донных осадков изучался рассеянный осадочный материал (взвесь) не только в океане, но и во взаимодействующих с ним средах (атмо-, крио- и другие сферы), что позволило проследить весь путь осадочных частиц от источников до участков осаждения на дне, т.е. рассматривать седиментацию на дне океана как часть больших циклов осадочного вещества, находящихся во взаимодействии. Это осадочное вещество атмосферы, криосферы (снег, лед), гидросферы, континентальной литосферы (речной сток), биосферы и эндогенное вещество вулканических областей суши и океанского дна [Лисицын, 1956, 2001а,б, 2003, 2004, 2009].

Удалось изучить осадочный процесс не только во всех геосферах, извлекая ничтожные его количества, но и вести инситуные наблюдения в потоках осадочного вещества с помощью седиментационных ловушек, спутниковых данных и др., в деталях изучать вещественный и гранулометрический составы. Именно с такой новой программой литолого-геохимических исследований были начаты сравнительные исследования осадконакопления в Арктике около 10 лет назад.

3. В Арктике с особенной четкостью проступает определяющее влияние среды, климата и биоты на ход осадочного процесса на всех его стадиях от подготовки осадочного вещества в ледовых водосборах суши (области наземного и подземного оледенения) до транспортировки льдами разных типов с траекториями их движения и необычными областями разгрузки (возникновение крупных ледовых депоцентров вдали от суши).

4. Ранее особенности морской ледовой седиментации (Арктика), коренным образом отличающейся от континентальной (Антарктида), были рассмотрены [Лисицын, 1978, 1994а; Lisitzin, 2004; Шевченко, 2006; Кравчишина, 2007; Stein, 2008]. Здесь мы приводим новые данные, касающиеся особенностей морской ледовой седиментации для высокоширотной северной части океана на площади более 10 млн км², т.е. речь идет о процессах глобальных масштабов.

5. Лед — это твердая форма воды, образованная при замерзании морской соленой воды и отжима из нее рассолов. Поэтому сам факт существования на поверхности океана замерзшего слоя пресных вод толщиной 1—3 м (а в некоторых местах до 5—6 м), его движение по определенным траекториям на тысячи километров (дрейфы «Фрама», СП и др.) и, наконец, заполнение осадочным материалом и разгрузка — все эти явления для геолога-осадочника новые.

6. Нами установлено явление ледовых насосов нескольких типов: 1) захват—отрыв части осадочного вещества с берега при вскрытии; 2) значительное большее значение имеет процесс захвата тонкого осадочного вещества взвеси из воды при образовании припайных льдов (переохлажденная вода и частицы взвеси как ядра конденсации с последующим всплыванием на поверхность). Область Великой Сибирской полярной, возникающей у берегов Российской Арктики, — главная область работы насоса такого рода, именно здесь по обсчетам гляциологов возникает более 50 % дрейфующих льдов.

Существует несколько типов морских льдов, которые подразделяются по возрасту на однолетние и многолетние (паковые), а также по генезису (припайные, речные и др.).

7. Начато прямое изучение количества и состава осадочного вещества в пробах льда, полученных специальными бурами [Шевченко, 2006], а также многолетние исследования биологии и химического состава [Мельников, 1989; и др.]. Эти исследования льда и биоты велись одновременно с изучением подледной толщи вод (до 5 км) и донных осадков. Среднее содержание осадочного вещества в льдах Арктики меняется в больших пределах, нами принято 30 мг/л, т.е. почти равно среднему его содержанию в реках Сибири (36 мг/л). Средние содержания в морской воде Арктики 0.1—1 мг/л.

8. Лед — идеальный планшет для накопления аэрозолей (сухие и мокрые выпадения). Наши специальные исследования потоков аэрозолей показали, что наряду с терригенным тонким веществом важное значение имеет биогенная составляющая (до 50 %), а также загрязнения. Дальний перенос на тысячи километров осадочного вещества и загрязнений прослежен из Европы в Западную Арктику, а из Японии и США — в Восточную.

Эоловый материал составляет 10—15 % от осадочного материала льдов.

9. Ледовый покров на огромной территории океана гасит волны, возникают особые «условия динамической зимы».

10. Лед и снег содержат небольшое количество биогенных элементов эолового генезиса, что проявляется летом «по цветению» снежниц на поверхности льда, а также по появлению временных поясов высоких первичных продукций по кромке тающих льдов (в пределах области развития однолетних льдов).

Огромную роль лед и снег на его поверхности имеют как ограничители работ природных «солнечных батарей» — цветения фитопланктона. Наиболее важна роль снега: его покров толщиной более 30 см прекращает фотосинтез. Фотосинтез начинается после стаивания слоя снега и, как удалось установить, может развиваться под чистым льдом-«световодом» толщиной до 2—3 см.

Многолетние льды тают с поверхности каждое лето с образованием снежниц, где концентрируется осадочный материал. Зимой снежницы вмерзают в лед, а ледовые поля восстанавливают свою толщину за счет нарастания снизу. Таким образом, многолетние льды имеют обратную стратиграфию — самые древние их части оказываются близ поверхности.

11. Важное значение имеет холодная дистилляция воды в глобальных масштабах. Каждую осень при замерзании морской воды идет отжим рассолов — тяжелой ее части. Эти рассолы оседают на дно и по понижениям рельефа стекают на континентальный склон, достигая глубоководных участков дна (формирование придонного слоя). Этот процесс также удалось изучить по взвешенному рассеянному осадочному веществу в рассолах.

12. В ходе дрейфа льдов (по сути, потоков пресной воды в твердом виде), который прослежен на протяжении многих десятилетий для всей Арктики, происходит перенос огромных масс льда (пресной воды) и осадочного материала, включенного в его толщу, на расстояния во многие тысячи километров. Главные системы дрейфа на выходе из Атлантического бассейна объединяются в проливе Фрама (между Гренландией и Шпицбергом), где встречаются ветвь теплого атлантического течения. Здесь идет главная разгрузка льдов всей Арктики. Это главный ледовый депоцентр Арктики (Гренландский). Таяние льда идет здесь непрерывно (круглый год) по границе вод с температурой 0...+2 °С, давая начало холодной части глобального конвейера Брокера.

13. Детальное изучение осадочного материала, поступающего из атмосферы, захваченного ледовыми наносами, и осадочного материала в подледной толще воды в сопоставлении с количеством и составом осадочного материала на дне впервые дало возможность не только доказать существование этого нового (т.е. противоречащего «фундаментальной теории») типа осадков, но и дать необходимые количественные и качественные параметры для сопоставления современных осадков этого типа с древними [Lisitzin, 2002].

14. Морская ледовая седиментация особенно четко показывает определяющее влияние среды, климата и биоты на ход осадочного процесса. Существенное значение имеет также поступление эндогенного материала из спредингового хр. Гаккеля, что еще предстоит изучить в ближайшие годы [Лисицын, 1993].

15. В целом по независимым определениям вклад ледового материала в донные осадки Арктики — более 50 %, по другим определениям — более 70 %. По всем основным показателям — это особый тип морского ледового седиментогенеза, тесно связанного со средой и климатом, т.е. климатическая зональность четко просматривается в морях и океанах, что ранее удалось установить для других зон [Безруков, 1962а; Лисицын, 1978, 1961а,б; 1991; Гершанович, Котенев, 1991].

Пользуюсь случаем выразить благодарность коллегам, принимавшим участие в арктических экспедициях, а также в обработке собранных материалов: В.В. Шевченко, В.М. Купцову, В.В. Серовой, И.А. Немировской, А.Ю. Леин, И.А. Мельникову, В.Т. Паке, Н.В. Политовой, А.Н. Новигатскому, А.А. Клювиткину, М.Д. Кравчишиной, А.С. Филиппову, а также иностранным коллегам, поддержавшим эти исследования: И. Тиде, Г. Штейну, Х. Кассенс.

Особенно хочется поблагодарить экипажи научно-исследовательских судов и подводных обитаемых аппаратов, работавших в трудных условиях высокоширотных экспедиций.

Научные исследования поддерживались Президиумом РАН (программы фундаментальных исследований № 16 и 17), отделением наук о Земле РАН, РФФИ (гранты 07-05-00691, 08-05-00860, 08-05-00094, 09-05-00658), грантом Президента РФ № НШ-361.2008.5, Российско-Немецкой лабораторией им. О.Ю. Шмидта.

ЛИТЕРАТУРА

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира / Ред. В.М. Котляков. М., Картография, 1977, т. I, 212 с.; т. II, 270 с.

Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. М., ГУГиК, 1980, 184 с.

Атлас Арктики. М., ГУТК, 1985, 204 с.

- Безруков П.Л.** Некоторые проблемы зональности осадкообразования в Мировом океане // Тр. Океанограф. комиссии. 1962а, т. 10, вып. 3, с. 3—9.
- Безруков П.Л.** Неравномерность распределения глубоководных океанических осадков // Океанология, 1962б, т. 2, вып. 1, с. 9—26.
- Белов Н.А., Лапина Н.Н.** Донные отложения Арктического бассейна. Л., Гидрометеиздат, 1961, 152 с.
- Белое море.** Биологические ресурсы и проблемы рационального использования / Ред. О.А. Скарлатто. Исследования фауны морей. СПб., ЗИН РАН, 1995, вып. 22 (50). В 2 ч., 250 с.
- Белое море** и его водосбор под влиянием климатических и антропогенных факторов / Под ред. Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика. Петрозаводск, Изд-во КНЦ РАН, 2007, 335 с.
- Бергер В.Я.** Продукционный потенциал Белого моря. СПб., ЗИН РАН, т. 60, Исследование морей. 2007, 292 с.
- Богоров В.Г.** Биологическая структура океана // Докл. АН СССР, 1959, т. 128, № 4, с. 819—822.
- Богоров В.Г.** О количестве веществ в живых организмах Мирового океана // Органическое вещество современных и ископаемых осадков / Ред. Н.Б. Вассоевич. М., Наука, 1971, с. 12—16.
- Богоров В.Г., Зенкевич Л.А.** Биологическая структура океана // Экология морских организмов. М., Наука, 1966, с. 3—14.
- Богоров В.Г., Виноградов М.Е., Воронин К.М., Канаева И.П., Суетова И.А.** Распределение зоопланктона в поверхностном слое Мирового океана // Докл. АН СССР, 1968, т. 182, № 5, с. 1205—1207.
- Бондур В.Г.** Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. М., Наука, 2004, т. 1, с. 55—118.
- Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Ведерников В.И.** Подспутниковые измерения цвета океана: верификация данных сканера цвета SeaWiFS // Океанология, 2000, т. 40, № 3, с. 357—363.
- Бязров Л.Г.** Лишайники в экологическом мониторинге. М., Научный мир, 2002, 336 с.
- Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д.** Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л., Гидрометеиздат, 1985, 182 с.
- Ведерников В.И., Демидов А.Б., Судьбин А.И.** Первичная продукция и хлорофилл в Карском море в сентябре 1993 г. // Океанология, 1994, т. 34, № 5, с. 693—704.
- Виноградов М.Е.** Развитие биологических сообществ и биологический баланс океана // Океанология на старте XXI века / Ред. А.Л. Верещака. М., Наука, 2008, с. 257—293.
- Виноградов М.Е., Лисицын А.П.** Глобальные закономерности распределения жизни в океане и их отражение в составе донных осадков. Закономерности распределения планктона и бентоса в океане // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1981, № 3, с. 5—28.
- Виноградов М.Е., Шушкина Э.А.** Экосистемы арктической пелагиали // Опыт системных океанологических исследований в Арктике. М., Научный мир, 2001, с. 282—289.
- Виноградова А.А., Полиссар А.В.** Элементный состав аэрозоля в атмосфере центральной части Российской Арктики // Изв. РАН, Физика атмосферы и океана, 1995, т. 32, с. 264—274.
- Виноградова А.А., Егоров В.А.** О возможностях дальнего атмосферного переноса загрязнений в Российскую Арктику // Изв. РАН, Сер. Физика атмосферы и океана, 1997, т. 32, № 6, с. 796—802.
- Гаврилов А.В.** Криолитозона арктического шельфа Восточной Сибири: Автореф. дис. ... д. г.-м.н. М., 2009, 48 с.
- Гершанович Д.Е., Котенев Б.Н.** Зональность в распределении осадков на материковом склоне // Климатическая зональность осадкообразования. М., Наука, 1991, с. 85—97.
- Гордеев В.В.** Речной сток в океан и черты его геохимии. М., Наука, 1983, 159 с.
- Гордеев В.В.** Реки Российской Арктики: потоки осадочного материала с континента в океан / Под ред. М.Е. Виноградова, С.С. Лаппо. Новые идеи в океанологии. Т. 2. М., Наука, 2004, с. 113—168.
- Гордеев В.В.** Система река—море и ее роль в геохимии океана: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. М., 2009, 36 с.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П.** Средний химический состав взвесей рек мира и питание океанов речным осадочным материалом // Докл. АН СССР, 1978, т. 238, № 1, с. 225—228.
- Гордеев В.В., Лисицын А.П.** Тяжелые металлы в ледовом покрове Баренцева моря // Океанология, 2005, т. 45, № 5, с. 777—784.
- Гурвич Е.Г.** Сток микроэлементов и факторы, его определяющие (на примере северных рек СССР и рек Черноморского побережья Кавказа). М., ИОАН-МГУ, 1972, 158 с.
- Докучаев В.В.** Учение о зонах природы. СПб., 1899, 356 с.
- Емельянов Е.М.** Барьерные зоны в океане. Осадко- и рудообразование, геоэкология. Калининград, Янтарный сказ, 1998, 416 с.

- Захаров В.Ф.** Морские льды в климатической системе. СПб., Гидрометеиздат, 1996, 213 с.
- Зенкевич Л.А.** Моря СССР. Их флора и фауна. М., Учпедгиз, 1956, 417 с.
- Зенкевич Л.А.** Общая характеристика биогеоценозов океана и сравнение их с биогеоценозами суши // Программа и методика изучения биогеоценозов водной среды. М., Наука, 1970, с. 24—37.
- Зенкевич Л.А.** Материалы к сравнительной биоценологии суши и океана // Избр. труды. Т. 2. Биология океана. М., 1977, с. 67—82.
- Климатическая зональность** и осадкообразование / Под ред. А.П. Лисицына, Д.Е. Гершановича. М., Наука, 1991, 194 с.
- Копелевич О.В., Буренков В.И., Гольдин Ю.А., Карабашев Г.С.** Оптические методы в океанологии и морской геологии // Новые идеи в океанологии. М., Наука, 2004, т. 1, с. 118—143.
- Котляков В.М.** Мир снега и льда. М., Наука, 1994, 285 с.
- Кошелева В.А., Яшин Д.С.** Донные осадки арктических морей. СПб., ВНИИОкеангеология, 1999, 286 с.
- Кравчишина М.Д.** Вещественный состав водной взвеси Белого моря: Автореф. дис. ... к. г.-м.н. М., Ин-т океанологии, 2007, 24 с.
- Кравчишина М.Д.** Взвешенное вещество Белого моря и его гранулометрический состав. М., Научный мир, 2009, 312 с.
- Кравчишина М.Д., Мицкевич И.Н., Веслополова Е.Ф., Шевченко В.П., Лисицын А.П.** О взаимосвязи взвеси и микроорганизмов в водах Белого моря // Океанология, 2008, т. 48, № 6, с. 900—918.
- Куценогий К.П., Куценогий П.К.** Аэрозоли Сибири. Итоги семилетних исследований // Сибирский экологический журнал, 2000, № 1, с. 11—20.
- Левитан М.А., Лаврушин Ю.А., Штайн Р.** Очерки истории седиментации в Северном Ледовитом океане и морях Субарктики в течение последних 130 тыс. лет. М., ГЕОС, 2007, 404 с.
- Леин А.Ю., Русанов И.И., Саввичев А.С., Пименов Н.В., Иванов М.В.** Биогеохимические процессы циклов серы и углерода в Карском море // Геохимия, 1996, № 11, с. 1027—1045.
- Леин А.Ю., Саввичев А.С., Русанов И.И., Павлова Г.А., Кузьмина Т.Г., Дара О.М., Ульянова Н.В.** Геохимические процессы на границе вода—дно в Чукотском море // Современные экологические проблемы Севера. К 100-летию со дня рождения О.И. Семенова-Тян-Шанского (Материалы Международной конференции 10—12 октября 2006 г.). Ч. 2. Апатиты, 2006, с. 87—88.
- Лизунов Н.В., Лисицын А.П.** Состав взвеси Берингова моря по данным спектрального анализа // Докл. АН СССР, 1955, т. 104, № 4, с. 593—596.
- Лисицын А.П.** Некоторые данные о распределении грубообломочного материала в современных морских отложениях // Докл. АН СССР, 1951, т. 80, № 6, с. 81—84.
- Лисицын А.П.** Атмосферная и водная взвесь как исходный материал для образования морских осадков // Тр. Ин-та океанологии АН СССР, 1955, т. 13, с. 16—22.
- Лисицын А.П.** Методы отбора и исследования водной взвеси для геологических целей // Тр. Ин-та океанологии АН СССР, 1956, т. 19, с. 204—230.
- Лисицын А.П.** О типах морских отложений, связанных с деятельностью льдов // Докл. АН СССР, 1958, т. 118, № 2, с. 373—376.
- Лисицын А.П.** Новые данные о распределении и составе взвешенных веществ в морях и океанах в связи с вопросами геологии // Докл. АН СССР, 1959, т. 126, № 4, с. 863—866.
- Лисицын А.П.** Морские ледовые отложения полярных областей и эпох оледенения и их значение для палеогеографии // XIX Международный географический конгресс в Стокгольме, 1960 г. М., Изд-во АН СССР, 1961а, с. 33—43.
- Лисицын А.П.** Закономерности ледового разноса грубообломочного материала в морях и океанах // Современные осадки морей и океанов. М., Изд-во АН СССР, 1961б, с. 175—232.
- Лисицын А.П.** Процессы современного осадкообразования в Беринговом море. М., Наука, 1966, 584 с.
- Лисицын А.П.** Осадкообразование в океанах. М., Наука, 1974, 438 с.
- Лисицын А.П.** Процессы океанской седиментации // Литология и геохимия. М., Наука, 1978, 391 с.
- Лисицын А.П.** Тектоника и рудообразование в океанах // Гидродинамический анализ и закономерность формирования и размещения полезных ископаемых. Л., ВСЕГЕИ, 1987, с. 32—55.
- Лисицын А.П.** Лавинная седиментация и перерывы в осадкообразовании в морях и океанах. М., Наука, 1988, 309 с.
- Лисицын А.П.** Зональность природной среды и осадкообразование в океанах // Климатическая зональность и осадкообразование. М., Наука, 1991, с. 5—45.

Лисицын А.П. Гидротермальные системы Мирового океана. Поставка эндогенного вещества // Гидротермальные системы и осадочные формации срединно-океанических хребтов Атлантики. М., Наука, 1993, с. 147—245.

Лисицын А.П. Ледовая седиментация в Мировом океане. М., Наука, 1994а, 448 с.

Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология, 1994б, т. 34, № 5, с. 735—743.

Лисицын А.П. Потоки вещества и энергии во внешних и внутренних сферах Земли / Под ред. Н.А. Добрецова, В.И. Коваленко // Глобальные изменения природной среды — 2001. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001а, с. 163—249.

Лисицын А.П. Нерешенные проблемы океанологии / Под ред. А.П. Лисицына, М.Е. Виноградова, Е.А. Романкевича // Опыт океанологических исследований в Арктике. М., Научная мысль, 2001б, с. 31—76.

Лисицын А.П. Новые возможности четырехмерной океанологии и мониторинга второго поколения — опыт двухлетних исследований на Белом море // Актуальные проблемы океанологии. М., Наука, 2003, с. 501—534.

Лисицын А.П. Потоки осадочного вещества, природные фильтры и осадочные системы «живого океана» // Геология и геофизика, 2004, т. 45 (1), с. 15—48.

Лисицын А.П. Маргинальные фильтры и биофильтры Мирового океана // Океанология на старте XXI века. М., Наука, 2008, с. 159—225.

Лисицын А.П. Закономерности осадкообразования в области быстрого и сверхбыстрого осадко-накопления (лавинной седиментации в связи с образованием нефти и газа в Мировом океане) // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (4), с. 373—400.

Лисицын А.П., Чернышева В.И. Каменный материал в донных отложениях северной части Тихого океана // Тихий океан. Т. VI. Кн. 1. М., Наука, 1970, с. 237—296.

Лисицын А.П., Гордеев В.В. О химическом составе взвеси и воды морей и океанов // Литология и полезные ископаемые, 1974, № 3, с. 38—57.

Лисицын А.П., Виноградов М.Е. Глобальные закономерности распределения жизни в океане и их отражение в составе донных осадков. 2. Образование и распространение биогенных осадков // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1982, № 4, с. 5—24.

Лисицын А.П., Виноградов М.Е. Международная высокоширотная экспедиция в Карское море (49-й рейс научно-исследовательского судна «Дмитрий Менделеев») // Океанология, 1994, т. 34, № 5, с. 643—652.

Лисицын А.П., Гордеев В.В. Пятая Международная конференция по проекту «Взаимодействие суша—океан в Российской Арктике» // Океанология, 2003, т. 43, № 4, с. 632—633.

Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И., Копелевич О.В., Васильев Л.Ю. Взвесь и гидрооптика Белого моря: новые закономерности количественного распределения и гранулометрии // Актуальные проблемы океанологии. М., Наука, 2003, с. 556—608.

Лисицын А.П., Харин Г.С., Чернышева Е.А. Грубообломочный материал ледового разноса на дне Карского моря // Океанология, 2004а, т. 44, № 3, с. 440—456.

Лисицын А.П., Харин Г.С., Чернышева Е.А. Базальты в грубообломочном материале донных осадков Карского моря // Океанология, 2004б, т. 44, № 4, с. 589—599.

Лукашин В.Н. Седиментация на континентальных склонах под влиянием контурных течений. М., ГЕОС, 2008, 256 с.

Мельников И.А. Экосистема арктического морского льда. М., Недра, 1989, 102 с.

Морозов Н.П., Батурич Г.Н., Гордеев В.В., Гурвич Е.Г. О составе взвеси и осадков в устьевых районах Северной Двины, Мезени, Печоры и Оби // Гидрохимические материалы, 1974, т. 60, с. 70—73.

Немировская И.А. Углеводороды Белого моря // Геохимия, 2005, № 5, с. 542—554.

Океанология / Ред. А.С. Монин. М., Наука, 1977—1980, т. 1—10.

Петелин В.П. Гранулометрический анализ морских донных осадков. М., Наука, 1967, 125 с.

Петипа Т.С. Трофодинамика копепод в морских планктонных сообществах. М., Наука, 1981, 242 с.

Пивоваров С.В. Химическая океанография арктических морей России. СПб., Гидрометеиздат, 2000, 79 с.

Романкевич Е.А., Ветров А.А. Цикл углерода в арктических морях России. М., Наука, 2001, 302 с.

Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н., Лисицын А.П. Радионуклиды в исследовании Белого моря // Актуальные проблемы океанологии. М., Наука, 2003, с. 608—618.

Система моря Лаптевых и прилегающих морей Арктики: современное состояние и история развития / Под ред. Х. Кассенса, А.П. Лисицына, И. Тиде, Е.И. Поляковой, Л.А. Тимохова. М., Изд-во МГУ, 2009, 390 с.

Страхов Н.М. Проблемы геохимии современного океанического литогенеза. М., Наука, 1976, 299 с.

Страхов Н.М. Избранные труды. Осадкообразование в современных водоемах. М., Наука, 1993, 396 с.

Филюшкин Б.Н., Алейник Д.Л. Влияние гидродинамических процессов на потоки взвешенного вещества в океане // Новые идеи в океанологии. М., Наука, 2004, т. 1, с. 27—55.

Фролов И.Е., Гудкович З.М., Радионов В.Ф., Тимохов Л.А., Широков А.В. Научные исследования в Арктике. Т. I. Научно-исследовательские дрейфующие станции «Северный полюс». СПб., Наука, 2005, 288 с.

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М., Научный мир, 2001, 606 с.

Хаин В.Е., Лимонов А.Ф. Региональная геотектоника. Тверь, Изд-во ГЕРС, 2004, 270 с.

Чудаева В.А. Особенности питания дальневосточных морей речным осадочным материалом: Автореф. дис. ... к. г.-м. н. Владивосток, 1981, 24 с.

Чудаева В.А. Миграция химических элементов в водах Дальнего Востока. Владивосток, Дальнаука, 2002, 388 с.

Шапиро Г.И., Акивис Т.М., Пыхов Н.В., Анциферов С.М. Перенос мелкодисперсного осадочного материала мезомасштабными течениями в шельфово-склоновой зоне моря // Океанология, 2000, т. 40, № 3, с. 333—339.

Шевченко В.П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике. М., Наука, 2006, 226 с.

Шевченко В.П., Иванов Г.И., Буровкин А.А., Джиноридзе Р.Н., Зернова В.В., Поляк Л.В., Шанин С.С. Потоки осадочного материала в проливе Святой Анны и восточной части Баренцева моря // Докл. РАН, 1998, т. 359А, с. 400—403.

Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Смирнов В.В., Серова В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики — результаты десятилетних исследований // Оптика атмосферы и океана, 2000, т. 13, № 6/7, с. 551—576.

Шевченко В.П., Лисицын А.П., Виноградова А.А., Куценогий К.П., Смирнов В.В., Штайн Р. Аэрозоли Арктики и их влияние на окружающую среду // Аэрозоли Сибири. 2006. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2006, с. 148—184.

Шулькин В.М., Богданова Н.Н., Христофорова Н.Н. Содержание железа, марганца, цинка и меди в прибрежных водах Приморья // Океанология, 1983, т. 23, вып. 1, с. 30—35.

Bauch H.A., Polyakova E.Y. Diatom-inferred salinity records from the Arctic Siberian margin implications for fluvial pattern during the Holocene // Paleoceanology, 2003, v. 18, № 2, p. 5.1—5.10.

Bischoff J., Koch J., Kubish M., Spielhagen R., Thiede J. Nordic Seas surface ice drift reconstructions: evidence from ice-rafted coal fragments during oxygen isotope stage 6 / Eds. J.A. Dowdeswell, J.D. Scourse. Glacial marine environments: processes and sediments // Geol. Soc. London, Spec. Publ., 1990, v. 53, p. 235—251.

Boggild O.B. On the bottom sediments of the North Polar Sea / Ed. F. Nansen. Norwegian North Polar Expedition 1893—1896 // Sci. Res., 1906, v. 5, p. 1—62.

Boström K., Thiede J. YMER-80, Swedish Arctic Expedition — cruise report from marine geology and geophysics, sediment core descriptions // Medd. Stockholm. Univ. Geol. Inst., 1984, v. 260, 123 p.

Chakrapani G.J. Factors controlling variations in river sediment loads // Current Science, 2005, v. 88, № 4, p. 569—575.

Dethleff D. Entrainment and export of Laptev Sea ice sediments, Siberian Arctic // J. Geoph. Rep., 2005, v. 110, p. C07009.

Dittmers K., Niessen F., Stein R. Holocene sediment budget and sedimentary history of the Ob and Yenisei estuaries // Siberian river run-off in the Kara Sea. Characterisation, quantification, variability and environmental significance / Eds. R. Stein, K. Fahl, D. Futerer, E. Galimov, O. Stepanets. Amsterdam, Elsevier, 2003, p. 457—487.

Duce R.A., Liss P.S., Merrill J.T., Atlas E.L., Buat-Menard P., Hicks B.B., Miller J.M., Prospero J.M., Arimoto R., Church T.M., Ellis W., Galloway J.N., Hansen L., Jickells T.D., Knap A.H., Reinhard K.H., Schneider B., Soudine A., Tokos J.J., Tsunogai S., Wollast R., Zhou M. The atmospheric input of the trace species to the world ocean // Global Biogeochem. Cycles, 1991, v. 5, № 3, p. 193—259.

- Edwards M.H., Coakley B.J.** The SCICEX program — Arctic Ocean investigations from a US Navy Nuclear- Powered Submarine // Arctic Res. of the United States, 2004, v. 18, p. 14—20.
- Edwards M.H., Kurras G.J., Toletoy M., Bohnenstiehl D.R., Coakley D.R., Cochran J.R.** Evidence of recent volcanic activity on the ultraslow-spreading Gakkel Ridge // Nature, 2001, v. 409, p. 808—812.
- Eicken H., Gradinger R., Graves A., Mahoney A., Rigor I.** Sediment transport by sea ice in the Chukchi and Beaufort Seas: Increasing importance due to changing ice conditions? // Deep Sea Res. Pt. II, 2005, v. 52, p. 3281—3302.
- 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.
- Gurevich V.I.** Recent sedimentogenesis and environment on the Arctic shelf of Western Eurasia. Oslo, Meddelelser, 1995, № 131, 92 p.
- Hargrave B.T.** North water Polynya // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean / Eds. R. Stein, R. Macdonald. Heidelberg, Springer, 2004, p. 103—106.
- Hargrave B.T., von Bodungen B., Conover R.J., Fraser A.J., Phillips G., Vass W.P.** Seasonal changes in sedimentation of particulate matter and lipid contents of zooplankton collected by sedimentary trap in the Arctic Ocean off Axel Heiberg Island // Polar Biology, 1989, v. 9, p. 467—475.
- Hargrave B.T., von Bodungen, Stoffyn-Egli P., Mudi P.J.** Seasonal variability in particle sedimentation under permanent ice cover in the Arctic Ocean // Continental Shelf Res., 1994, v. 14, № 2/3, p. 279—293.
- Hebbeln D., Wefer G.** Effects of ice coverage and ice-rafted material on sedimentation in the Fram Strait // Nature, 1991, v. 350, p. 409—411.
- Honjo S., Manganini S.J., Wefer G.** Annual particle flux in the Polar oceans / Ed. W.O. Smith. Polar Oceanography. San Diego, Acad. Press, 1990, p. 687—739.
- Honjo S., Manganini S.J., Krishfield R., Francois K.** Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biogenic pump: a synthesis of global sediment programs since 1983 // Progress in Oceanography, 2008, v. 76, p. 217—285.
- Ivanov V.V., Shapiro G.I., Huthnance J.M., Aleynik D.L., Golovin P.N.** Cascades of dense water around the world ocean // Progress in Oceanography, 2004, v. 60, p. 47—98.
- Land-ocean systems** in the Siberian Arctic: dynamics and history / Eds. H. Kassens, H. Bauch, I. Dmitrenko, H. Eicken, H.W. Hubberten, J. Thiede, L. Timokhov. Berlin, Springer Verl., 1999, 711 p.
- Lisitzin A.P.** Sedimentation in the World Ocean, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Tulsa, SEPM Spec. Publ., 1972, № 17, 128 p.
- Lisitzin A.P.** The continental-ocean boundary as a marginal filter in the World oceans // Biogeochemical cycling and sediment ecology. NATO ASI. Ser 2. Environment. Dordrecht Kluwer, 1998, v. 59, p. 69—105.
- Lisitzin A.P.** Sea-Ice and Iceberg Sedimentation in the Ocean. Recent and Past. Berlin, Springer Verl., 2002, 563 p.
- Longhurst A.** Ecological geography of the sea. San Diego, Acad. Press, 1998, 398 p.
- Reimnitz E., McCormick M., Bischof J., Darby D.A.** Comparing sea-ice sediment load with Beaufort Sea shelf deposits: is entrainment selective? // J. Sedim. Res., 1998, v. 68, № 5, p. 777—787.
- Sakshaug E.** Primary and secondary production in the Arctic Seas // The organic carbon cycle in the Arctic Ocean. Berlin, Springer Verl., 2004, p. 57—81.
- Stein R.** Arctic Ocean sediments: processes, proxies and paleoenvironment // Amsterdam, Springer, 2008, 592 p.
- The organic carbon** cycle in the Arctic Ocean / Eds. R. Stein, R.W. MacDonald. Heidelberg, Springer Verl., 2004, 363 p.
- Wadhams P.** Ice in the ocean. Australia, Gordon and Breach. Sci. Publ., 2000, 351 p.
- Walker R.C.** Arctic deltas // J. Coastal Res., 1998, v. 14, № 3, p. 718—738.
- White Sea.** Its marine environment and ecosystem dynamics influence by global change / Eds. N. Filatov, D. Pozdnyakov, O.M. Johannsen, L.H. Pettersson, L.P. Bobylev. Chichester, Springe, 2005, 472 p.
- Zeitchell B.P., Diekmann P., Uhlmann A.** A new multisample sediment trap // Marine Biol., 1978, v. 45, p. 285—288.

Поступила в редакцию
26 июня 2009 г.