

ВВЕДЕНИЕ

Роль Баренцева моря в осадочных процессах в Арктике

А.П. Лисицын, М.Д. Кравчишина

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

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(3)

Монография «Система Баренцева моря» стала продолжением серии коллективных монографий, посвященных системным четырехмерным исследованиям морей европейской части России (Белое, Балтийское, Черное и Каспийское), вышедших в свет в 2010–2018 гг. при поддержке Российского научного фонда и Российского фонда фундаментальных исследований. Все эти книги связаны одной идеей и единой методологией.

Монография «Система Баренцева моря» составлена как коллективная работа большого числа квалифицированных ученых, обладающих уникальным многолетним опытом работ в Баренцевом море и других арктических морях. Авторский коллектив этой работы объединяет 87 исследователей из 24 научных организаций. Монография состоит из 10 глав, в которых представлены результаты исследований во всех геосферах (атмосфера, криосфера, гидросфера, биосфера, литосфера, антропосфера).

Замысел книги, которая предлагается вашему вниманию, родился вместе с возобновлением в 2015 г. регулярных комплексных экспедиционных исследований Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН в Баренцевом море (Приложение 1 и 2). Основной целью исследований стало сопряженное изучение условий и процессов современной и древней седиментации с оценкой потоков вещества и загрязнений в области взаимодействия Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана (СЛО) для решения задач обоснованного прогноза климата и среды будущего [Кравчишина и др., 2019; Политова и др., 2019; Ключевиткин и др., 2020].

Баренцево море является одним из наиболее изученных морей на евразийском арктическом шельфе, где проводятся систематические работы с начала XX в. Лидерами отечественных исследований в этом регионе являются Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, Морская арктическая геологоразведочная экспедиция, ВНИИОкеангеология, Полярный геофизический институт КНЦ РАН, ПИНРО им. Н.М. Книповича, ФГБУ «Гидрометцентр России», ГНЦ РФ «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» и др. Инсти-

тут океанологии имени П.П. Ширшова РАН проводит океанологические и палеоокеанологические исследования в Баренцевом море уже около 40 лет. Тем не менее, интерес к исследованию этого моря в последнее время только возрастает, чем отчасти обусловлена актуальность издания нашей монографии. В 2000-х гг. в зарубежной научной литературе наблюдается всплеск публикаций, касающихся различных аспектов изучения баренцевоморского региона: от обсуждения вопросов тектоники до изучения атмосферных процессов. Многочисленные исследования сосредоточены на трансформации и возрастающем влиянии атлантической воды на климат и биоразнообразии Арктики.

Баренцево море расположено вдоль основного пути (помимо второй трассы через пролив Фрама) поступления атлантической воды в СЛО. Процессы водообмена между этими двумя океанами формируют климат Европы и, очевидно, влияют на климат Земли в целом. В 2000-х гг. увеличилось проникновение атлантической воды на север, то есть усилилась «атлантификация» СЛО, что способствовало переносу тепла в Арктику и привело к прогнозируемым климатическим изменениям. Термин «атлантификация» изначально был введен в научную литературу применительно к гидрофизическим процессам в Баренцевом море [Reigstad et al., 2002; Årthun et al., 2012]. Последние годы этот термин все чаще употребляется в связи с усилением влияния атлантической воды (АВ) на гидрологический режим СЛО в целом [Polyakov et al., 2017; Аксенов, Иванов, 2018].

В период с 1998 по 2008 гг. ежегодная площадь морского льда в Баренцевом море сократилась на 50% [Årthun et al., 2012], что связано с сильным сокращением ледяного покрова во все сезоны, включая зиму. Сезонные вариации распространения морского льда в Баренцевом море довольно предсказуемы по сравнению с другими районами СЛО [Sigmund et al., 2016]. Однако температура и соленость АВ в Баренцевом море изменяются в многодекадных временных масштабах [Smedsrud et al., 2013], что затрудняет различие между долгосрочными тенденциями и естественной изменчивостью.

Отсутствие сезонного таяния морского льда к югу от Полярного фронта привело к значительному увеличению солености и плотности баренцевоморской водной массы. Поскольку она формирует основную часть Арктической промежуточной воды, то изменения ее свойств могут иметь далеко идущие последствия для циркуляции и климата всего СЛО [Barton et al., 2018].

Гидрофизические, гидрохимические, биологические, геологические и биогеохимические процессы, протекающие в этой акватории, дают мгновенный сопряженный отклик, который определяет изменчивость всей арктической системы атмосфера – криосфера (морской лед) – гидросфера (океан) [Smedsrud et al., 2013]. АВ охлаждается и опресняется именно в Баренцевом море, вследствие чего это море является ключевым регионом для трансформации водных масс в «арктическом средиземноморье» [Laukert et al., 2019]. Теплая вода Северной Атлантики, пересекая баренцевоморский шельф, теряет тепло в арктической атмосфере. Установлен существенный рост температуры воды (на $\sim 0,2^\circ\text{C}$ за 10 лет) Баренцева моря за последние десятилетия (см. раздел 4.2). Следствием аномально большого переноса тепла через океан стало сокращение образования собственного морского льда в Баренцевом море зимой (см. раздел 4.3). Глобальное сокращение ледяного покрова в СЛО, в целом, способствует уменьшению поступления морского льда в северную часть Баренцева моря. Теплая «атлантическая» область Баренцева моря наступает на холодную «арктическую» зону вследствие сдвига Полярного фронта на север. Так, северная часть моря (к северу от Полярного фронта) постулируется как «горячая точка» потепления в Арктике [Lind et al., 2018]. Резкое увеличение температуры и солености воды отмечается с середины 2000-х годов. Это, очевидно, связано с недавним снижением поступления морского льда в «арктическую» зону Баренцева моря и, как следствие, уменьшением вклада пресной воды в результате таяния морского льда. Снижение доли талой пресной воды в водном балансе моря привело к ослаблению стратификации водной толщи, усилению вертикального перемешивания и возрастанию восходящих потоков тепла и соли на границе контакта арктической и атлантической водных масс (рисунок), которые препятствуют формированию сезонного ледяного покрова и увеличивают запас тепла в океане [Lind et al., 2018]. Красная область на рисунке характеризуется доминированием теплой и соленой Атлантической воды (AW), которая занимает весь водный столб, вплоть до дна, и отличается большими потерями тепла в атмосферу (зимой).

Синяя область доминирования арктической воды характеризуется наличием верхнего слоя холодной воды, сложной структурой (имеет промежуточный слой холодной и пресной арктической воды (ArW), которая залегает поверх глубинного слоя атлантической воды) и покрыта морским льдом. В этой области восходящие потоки тепла и соли из глубинного слоя атлантической воды являются наибольшими, поскольку здесь слабее вертикальная стратификация, а атлантический слой имеет более высокую температуру и соленость по сравнению с районами центральной Арктики. Приток морского льда из центральной Арктики является важным источником пресной воды в пограничном регионе (северной части Баренцева моря), поскольку талая вода морского льда усиливает нисходящие потоки пресной воды и уравновешивает восходящий поток соли, тем самым поддерживая стратификацию. Восходящий поток соленой воды ослабляет вертикальную стратификацию, что приводит к ее разрушению в пограничном регионе, а в дальнейшем – к смене арктического климата на атлантический, если нисходящего потока пресной воды становится недостаточно. Эти процессы имеют далекоидущие последствия для всего СЛО, которые еще слабо изучены.

Очевидно, что работы в этом регионе являются стратегически важными, здесь решаются главные задачи океанологии XXI в. В какой мере климатические изменения затрагивают геосистемы Арктики и влияют на условия ее среды и осадконакопления? Какими могут быть экологические следствия этих изменений? Это лишь малая часть вопросов, на которые попытались дать ответы авторы монографии.

Знание гидрологических условий необходимо для понимания целого ряда ключевых седиментологических процессов, протекающих в водной толще морей. С этой целью в разделе 4.1 представлен обзор гидрологических условий Баренцева моря на основе опубликованных данных за период 1946–2019 гг. Диапазон гидрофизического и гидрохимического контроля экосистем морского шельфа и биогеохимических процессов в водной толще и на границе вода – дно продемонстрирован в разделах 7.1, 8.1, 8.2, 9.1 и 9.4.

В мировом научном сообществе практически любой институт или лаборатория, связанные с исследованием Мирового океана, привлекают спутниковые методы для изучения поверхностного слоя воды [Organelli et al., 2017]. Это вызвано необходимостью физически оправданного и надежного прогноза дальнейшей эволюции морской геосистемы. Данные спутниковой альтиметрии и сканеров цвета поверхности морей России успешно используются и являются эффективным инструментом для монито-

ринга долговременной пространственно-временной изменчивости целого ряда параметров среды [Лаврова и др., 2011]. В нашей монографии обсуждаются данные дистанционного зондирования различных свойств поверхности моря из космоса: характеристик ледяного покрова, уровня режима, температуры воды, биооптических характеристик и уровня солнечной радиации Баренцева моря с момента вывода на орбиту соответствующих спутников (разделы 4.3, 4.4, 5.1 и 5.2).

Результаты биогеохимических и биологических исследований свидетельствуют об изменениях в экосистеме Баренцева моря, происходящих в настоящее

время. В составе фитопланктона установлены индикаторы усиления «атлантификации» арктического региона (см. раздел 8.1). Массовые цветения уникальной группы морского фитопланктона – кокколитофорид – могут воздействовать на климатические факторы вследствие влияния на балансы тепла и CO_2 в системе океан–атмосфера. Достигнуты определенные успехи в количественной оценке уровня кокколитофоридных цветений по спутниковым данным в южной части Баренцева моря (раздел 5.1).

В работе [Laukert et al., 2019] на основе изучения стабильного изотопа кислорода ($\delta^{18}\text{O}$), растворенного радиоиотопа неодима (ϵ_{Nd}) и растворенных

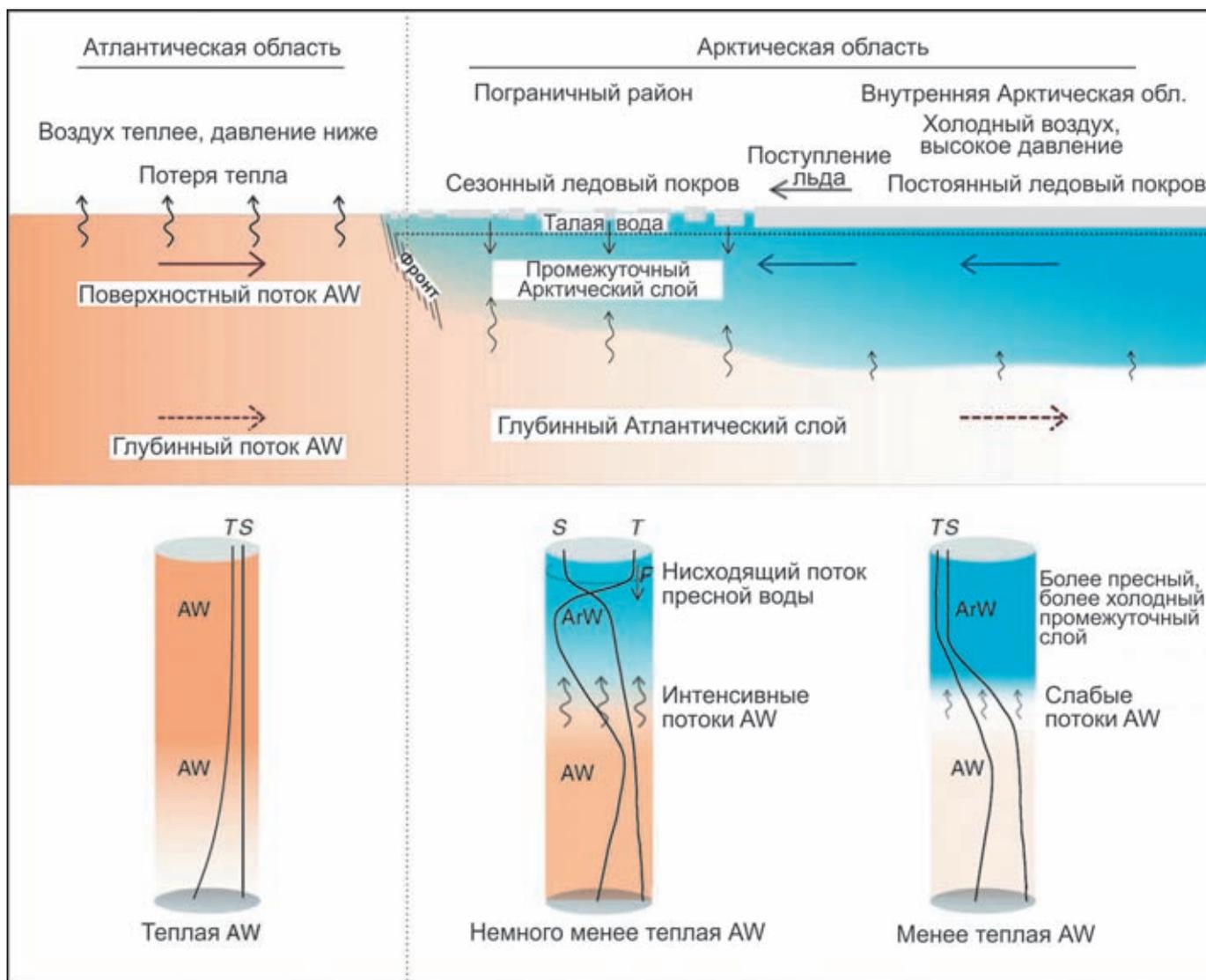


Рисунок. Зависимость северной части Баренцева моря от поступления морского льда из центральных арктических районов для поддержания стратификации и арктического климата в этом регионе по [Lind et al., 2018].

Вверху схематически показан вертикальный разрез водной толщи, следующий по пути Атлантической воды (AW) в Арктику; внизу даны характерные профили температуры (T) и солёности (S) в трех основных областях: доминирования атлантической воды, доминирования арктической воды и в собственно арктическом регионе. Горизонтальные стрелки показывают направление переноса воды, а вертикальные – направление вертикальных потоков

форм редкоземельных элементов (РЗЭ) показано, что трансформация теплой и соленой атлантической воды сопровождается также геохимическими изменениями, превосходящими ожидаемое преобразование состава воды просто от смешения водных масс разного генезиса.

В связи с этим в монографии обсуждается элементный состав взвеси Баренцева моря по данным ИСП-МС и ААС (см. раздел 6.2). Рассмотрено поведение литогенных, биофильных и редокс-чувствительных взвешенных форм элементов. Оцениваются величины вертикальных потоков осадочного вещества в водной толще и их состав. Показана роль зоопланктона в биотрансформации и вертикальном потоке органического углерода (см. разделы 6.3 и 8.2). Утилизация углерода фитопланктоном и потребление вновь созданного органического вещества (ОВ) зоо- и бактериопланктоном служат основой «биологического насоса». «Биологический насос» является важным компонентом глобального цикла углерода в океане и может подвергнуться значительным изменениям всех его составляющих систем в связи с климатическими изменениями [Passow, Carlson, 2012].

В настоящее время наблюдаются изменения различных звеньев цикла метана в Арктике. Отмечается рост концентрации метана (одного из важных парниковых газов) в водной толще моря с конца 1990-х годов. Высказана гипотеза о наступлении очередной фазы опреснения пограничного слоя вода – донные осадки в баренцевоморском бассейне, связанной с заметным региональным потеплением (см. раздел 9.1).

Продемонстрировано заметное влияние континентального аэрозоля на атмосферу Баренцева моря. Обсуждаются вероятные источники антропогенного загрязнения аэрозолей Арктики и Баренцева моря, в частности (см. раздел 3).

Значительная изменчивость системы атмосфера – криосфера (морской лед) – гидросфера (океан) в Арктике становится очевидной по косвенным записям климатических условий геологического прошлого, которые дают основания предполагать, что Баренцево море играло важную роль в климате Северного полушария, по крайней мере, в течение последних 2500 лет. В связи с этим большой интерес представляет исследование климатообразующих факторов, отраженных в ядрах донных осадков (см. главу 2). Приведено обобщение обширнейшего материала по изменению условий седиментации в плейстоцене и голоцене по микропалеонтологическим и изотопно-геохимическим маркерам (см. раздел 2.3). Поступление североатлантических вод на шельф Евразии через Баренцево море, несомненно, положительно сказывается на усложнении структуры сообществ

морских микроорганизмов и их биоразнообразия. В связи с наблюдавшимися климатическими изменениями возрос интерес и к малоизученной проблеме динамики береговой зоны последних тысячелетий (период голоцена) (см. раздел 2.1).

В монографии рассматриваются остро дискуссионные вопросы современной четвертичной геологии арктических морей, связанные с их оледенением, и тектонического районирования региона (см. главу 1). По проблеме тектонического районирования опубликовано не так уж много работ и картографических материалов, что повышает актуальность раздела 1.1, посвященной тектонике баренцевоморской континентальной окраины. Многие насущные вопросы современной четвертичной геологии Баренцева моря в связи с его оледенением подробно обсуждаются в разделе 1.2 в историческом контексте развития идей с привлечением новых материалов сейсмоакустического профилирования.

По изотопно-геохимическим данным убедительно показано, что основной вклад в формирование донных осадков центральных областей Баренцева моря вносят породы Северо-Европейской континентальной окраины, находящейся в зоне влияния транзита атлантической воды. Вклад осадочного материала, переносимого Трансполярным дрейфом, в формирование донных осадков Баренцева моря сравнительно невелик (см. раздел 9.5). Петрографический состав донного каменного материала в целом комплементарен набору горных пород областей сноса прилегающей суши (см. раздел 9.7).

Получено экспериментальное доказательство того, что при определенных физико-химических условиях осадки могут быть как очистителями морской среды, так и ее загрязнителями – при их мобилизации из осадков обратно в воду (см. раздел 9.6). Впервые представлены данные по геохимическим фракциям химических элементов в колонках донных осадков с высоким разрешением (см. раздел 9.4).

Программа широкомасштабного освоения запасов нефти и газа на арктическом шельфе России сопровождается строительством и эксплуатацией морских стационарных платформ, хранилищ углеводородов, прокладкой подводных трубопроводов, транспортировкой грузов, сейсмическими и буровыми работами. В связи с этим повышается актуальность оценки современной экологической ситуации шельфовых морей. Показано, что в настоящее время в открытых районах Баренцева моря нефтяное загрязнение отсутствует. Сделан вывод о благополучной радиоэкологической обстановке в акватории моря, не смотря на наличие большого количества потенциальных источников радиационного загряз-

нения. На примере Кольского залива дана оценка современного геоэкологического состояния фиордов восточной части Баренцева моря (см. главу 10).

Рассматривая представленную вашему вниманию монографию, следует отметить, что актуальность поднятых в ней вопросов не вызывает сомнений. Баренцево море играет ключевую роль в осадконакоплении всего Северного Ледовитого океана и влияет на климат Европы и арктического региона. Исследование условий седиментации Баренцева моря в голоцене и плейстоцене позволит понять направленность современных климатических колебаний для всего Северного полушария.

Далеко не все означенные научные проблемы удалось решить коллективу авторов этой книги. Однако по многим дискуссионным вопросам намечены перспективные пути решения, раскрыты новые подходы, представлены исчерпывающие обзоры современного состояния исследования, что

делает эту монографию интересной и востребованной на долгие годы.

Члены редколлегии выражают благодарность В.П. Шевченко за всемерную поддержку на всех этапах подготовки монографии, В.Г. Воронцовой, Т.Ю. Зелениной, С.С. Изотовой и А.А. Ключиткину за помощь в подготовке рукописи к печати, а также всем сотрудникам Лаборатории физико-геологических исследований ИО РАН, оказавшим посильный вклад в реализацию последнего проекта академика А.П. Лисицына.

Сбор и обработка материалов монографии «Система Баренцева моря» проводились в соответствии с государственным заданием ИО РАН (тема № 0149-2019-0007).

Издание монографии «Система Баренцева моря» осуществлялось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-15-00033).