

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*Текущие выводы и перспективы будущих исследований**М.Д. Кравчишина, А.П. Лисицын**Институт океанологии им. П.П. Шишова РАН, Москва*

DOI: 10.29006/978-5-6045110-0-8/(38)

Монография «Система Баренцева моря» завершает цикл книг, посвященных исследованиям морей европейской части России. Шельфовые моря представляют собой интересные и сложные системы, часто включающие уникальные градиентные зоны с резкими изменениями в пространстве физических, химических, биогеохимических и биологических параметров среды на коротких расстояниях. Полагаем, мы достигли значительного прогресса в понимании фундаментальных вопросов океанологии шельфовых морей. В том числе, определены важнейшие отличия в ходе осадочных процессов на шельфе и в открытых районах океана. Впервые проведено сопряженное изучение условий и процессов современной и древней седиментации с оценкой потоков вещества и загрязнений в морских системах разных климатических зон на основе многодисциплинарных (физических, химических, геологических и биологических) исследований от геодинамики до микробов.

В монографии «Система Баренцева моря» на основе системного «геосферного» подхода проанализированы данные о влиянии потепления климата на осадочные процессы. Уникальность этого моря заключается в его прямом контакте как с Северной Атлантикой, так и с Центральной Арктикой. Современные явления в этом море определяют изменчивость всей арктической системы атмосфера – криосфера (морской лед) – гидросфера (океан). Представлены свидетельства того, что Баренцево море играло важную роль в климате Северного полушария, по крайней мере, в течение последних 2500 лет.

Главная цель коллективной монографии состояла не только в понимании процессов, происходящих в Баренцевом море на фоне глобального потепления и масштабного освоения арктического шельфа, но и в формулировании новых гипотез и прогнозов на будущее. Как нам представляется, выбранная стратегия сопряженного изучения условий и процессов современной и древней седиментации с оценкой потоков вещества и загрязнений в области взаимодействия Северной Атлантики и Северного Ледовитого океана дает немедленные результаты для решения задач обоснованного прогноза климата и среды бу-

дущего. В настоящее время междисциплинарные исследования быстро развиваются. Их результаты отражены в 34 разделах монографии, каждый из которых вносит вклад в общее представление о современной геосистеме Баренцева моря и ее историческом прошлом. В конце каждого раздела сформулированы выводы, сфокусируем внимание лишь на некоторых из них.

1. Представлена исчерпывающая информация о тектоническом районировании Баренцева моря с позиции геодинамической эволюции и рассмотрены вопросы положения границы между Восточно-Европейской и Западно-Арктической платформами.

2. Подробно рассмотрены полемические вопросы формирования четвертичного покрова Баренцева моря. Оценена роль гляциогенных отложений в строении четвертичных отложений шельфа. Значительная часть современной акватории Баренцева моря испытала покровное площадное оледенение в позднем неоплейстоцене, когда ледники суши вышли на акваторию шельфа и распространились вплоть до изобат 100–150 м. К концу этого времени контуры ледового покрова сильно сократились за счет развития открытого моря, в том числе, под влиянием теплого Северо-Атлантического течения.

3. В свете вопросов влияния потепления климата, изменения уровня моря и тектонической активности возрастает интерес к изучению динамики береговой зоны южного побережья Баренцева моря в голоцене.

4. В южной и юго-восточной частях Баренцева моря выделены три литокомплекса и пять региональных палинозон, соответствующих определенным этапам развития седиментационных обстановок на этапе дегляциации и перехода к голоцену; выявлены их общие и региональные особенности.

5. Уникальность Баренцева моря по сравнению с другими арктическими морями связана с развитием основных групп (диатомовых и динофлагеллат) фитопланктона и их отражением в танатоценозах донных осадков. Распространение изученных микроостатков фитопланктона поверхностных вод отражает современный ледово-гидрологический сигнал. Получены данные по характерным ассоциациям,

связанным, в первую очередь, с перераспределением относительно теплых североатлантических вод.

6. Изучены комплексы остракод из различных районов арктического шельфа Евразии. Ископаемые комплексы континентального склона отражают периоды усиления влияния трансформированных атлантических вод, поступления талых ледниковых и речных вод, а также катастрофических событий начала дегляциации.

7. В послеледниковой истории Баренцева моря выделены три основных этапа, которым соответствуют специфические литостратиграфические горизонты в донных осадках: ранняя дегляциация, поздняя дегляциация и голоцен. Эти интервалы характеризовались различными палеообстановками. Поверхностный водный слой в течение всей дегляциации оставался более холодным, чем глубинный слой, подверженный влиянию атлантической воды.

8. Доказана существенная роль аэрозолей в формировании природной среды Арктики и, в частности, Баренцева моря. Выявлены элементы-индикаторы (Cr, Cu, Zn, As, Se, Br, Ag, Sb, Au, Pb) антропогенного загрязнения аэрозолей баренцевоморского региона и рассчитаны их потоки. Оценены средние потоки сажевого углерода на поверхность моря и побережья. Показано, что выпадение сажевого углерода на снег весной может понизить альбедо чистого снега на единицы процентов, внося существенные поправки в радиационный форсинг поверхности.

9. Дан обзор современных представлений о гидрологических условиях и рельефе дна Баренцева моря. Обсуждается классификация В.К. Ожигина и В.А. Ившина [1999] как наиболее обоснованная классификация водных масс.

10. Анализ среднемесячных данных температуры воды Баренцева моря показал её существенный рост (на $\sim 0.2^\circ\text{C}$ за 10 лет) за последние десятилетия. Обосновано предположение о связи колебаний температуры воды с явлением Эль-Ниньо, Северо-Атлантическим колебанием и изменениями Северо-Атлантического течения. Для периода спутниковых наблюдений прослеживается рост амплитуды, количества и продолжительности экстремальных температурных явлений с положительным знаком.

11. В XXI веке скорость уменьшения ледовитости в Баренцевом море максимальная по сравнению с другими арктическими морями. Возросла повторяемость мягких зим, произошло уменьшение средней сплоченности льда, уменьшилась толщина припайного льда. Изменчивость ледовитости носит циклический характер с периодом цикла, близким к 84 годам. Дается прогноз, что минимум ледовитости после 1935–1945 гг. следует ожидать в период с 2019 по 2029 гг.

12. За период спутниковых наблюдений (1992–2018 гг.) отмечается рост скорости смещения кромки льда в северо-восточном направлении на 0.3 км/год, а также установлено повышение уровня в Баренцевом море приблизительно на 6 см.

13. Анализ гидрохимических данных за последние 30 лет показал, что усиление притока атлантических вод способствовало не только увеличению первичного продуцирования органического вещества, но и значительной интенсификации окислительно-восстановительных и гидролитических процессов его преобразования, особенно в высокоширотной части Баренцева моря. Выделены акватории, в которых надежно фиксируется поступление углеводородов метанового ряда.

14. Наиболее значительные изменения показателя обратного рассеяния частицами взвеси и хлорофилла по спутниковым данным в настоящее время (2017–2018 гг.) фиксируются в северной части Баренцева моря (по сравнению со среднеклиматическим значением 1998–2011 гг.). Это может свидетельствовать о заметной трансформации состава рассеянного осадочного вещества верхнего слоя водной толщи, преимущественно ввиду сокращения поступления талого морского льда из Центральной Арктики.

15. Обобщены данные авторов и литературы по концентрации и составу рассеянного осадочного вещества в водной толще Баренцева и Печорского морей, а также ряда заливов западного побережья Новой Земли. Представлен анализ величин вертикальных потоков осадочного вещества в шельфовых морях и центральных районах Северного Ледовитого океана. Приходится констатировать, что все еще слабо изучена роль взвеси, поступающей в Баренцево море с атлантическими и арктическими водами.

16. Биогеохимические исследования свидетельствуют об изменениях в экосистеме водной толщи Баренцева моря, которые повлекли за собой рост концентрации растворенного метана, а также численности и биомассы микроорганизмов, начиная с 1997 г. по настоящее время.

17. Обобщение существующих немногочисленных данных по микобиоте Баренцева моря позволит оценить роль этого малоисследованного компонента экосистемы арктических морей. Уже имеются сведения о высокой выживаемости спор грибов в холодной морской воде, о значении микобиоты в контроле численности популяций диатомовых водорослей во льдах и в разложении древесных остатков. Грибы имеют значительный биологический потенциал в арктических морских экосистемах.

18. Изучение летних планктонных фитоценов на акватории Баренцева моря позволило установить,

что баренцевоморская популяция кокколитофориды *Emiliania huxleyi* имеет «атлантическое» происхождение. Цветения кокколитофорид в южной части моря отмечались в течение всего периода спутниковых наблюдений (с 1998 г. по настоящее время). Однако их интенсивность существенно варьирует во времени и обусловлена динамикой поступления атлантической воды. Массовые цветения этого вида, наблюдавшиеся последние годы и охватывающие значительные акватории южной части моря, напрямую связаны с изменениями климата Арктики. Впервые показано, что основным регулятором цветения этой кокколитофориды, помимо температуры воды, была концентрация фосфатов. Присутствие атлантических видов в составе планктонных фитоценов 80-х широт может быть следствием дальнего проникновения атлантической воды в высокую Арктику.

19. Обстоятельный обзор данных по распределению биомассы зоопланктона и его основных групп показал, что распределение *Calanus spp.* может быть использовано в качестве индикатора различных водных масс в Баренцевом море. Показано, что вертикальный поток органического углерода на дно почти на половину состоит из углерода, заключенного в составе фекальных пеллет, что важно для понимания цикла углерода в арктических морях. Не удалось выявить связи между температурой воды и биомассой мезозоопланктона в юго-западной части моря, наиболее подверженной влиянию атлантической воды. Однако, выводы о влиянии потепления климата на изменение количества зоопланктона, его направление и амплитуду пока преждевременны и неочевидны. Еще предстоит понять, как временные рамки развития различных трофических уровней взаимосвязаны с физической средой и экосистемой. Мы уже начинаем осознавать, что ни хлорофилл, ни фиксация углерода в сообществе часто не являются достаточными индикаторами того, как экосистема реагирует на физические процессы.

20. Анализ ретроспективного и современного материала видового разнообразия донной фауны дал возможность установить многолетнюю изменчивость его количественных характеристик. Оценен ущерб, который наносится донной фауне в результате тралового промысла; выделены районы экологической чувствительности.

21. Современные геохимические исследования в зоне контакта вода – донные осадки позволили установить признаки деградации субаквальных многолетнемерзлых пород, а также зафиксировать сигналы диссоциации приповерхностных газгидратов на мелководном шельфе. Есть основания полагать, что эти процессы связаны с «атлантификацией» Аркти-

ки в XXI веке. До сих пор в Баренцевом море еще не удалось извлечь из осадочной толщи образец газгидрата. Тем не менее, в норвежских водах моря надежно закартированы протяженные зоны метанового высачивания, холодные метановые сипы, покмарки и кратеры. При этом показано, что метан, преимущественно, термогенный. Однако для российской акватории Баренцева моря подобные данные все еще весьма фрагментарны и не систематизированы, а исследования термогенных процессов не носят системный характер.

22. Представлены новые материалы гранулометрического и минерального состава поверхностного слоя донных осадков Баренцева моря; обсуждаются геохимические особенности макро- и микроэлементного состава голоценовых осадков. Впервые приводятся результаты исследования геохимических фракций некоторых тяжелых металлов и изотопные характеристики современных донных осадков.

Установлено, что Al, Cr и Ni накапливаются за счет геохимически инертной литогенной формы, а накопление большинства тяжелых металлов (Pb, Cd, Cu, Ni, Co, Mn) и металлоида As происходит, главным образом, за счет гидрогенных процессов (адсорбция на аморфных Fe-Mn оксигидроксидах и глинистых частицах, вхождение в состав ОВ).

Роль осадочного материала, инкорпорированного во льды и переносимого Трансполярным дрейфом, в формировании поверхностных донных осадков Баренцева моря незначительна. По-видимому, основной вклад в формирование голоценовых донных осадков вносят породы Северо-Европейской континентальной окраины.

23. Исследование углеводородов в воде, взвеси и донных осадках показало отсутствие загрязнения в открытых районах Баренцева моря. В результате сравнительной оценки современных уровней радиоцезия в различных шельфовых морях сделан вывод о благополучной радиоэкологической обстановке в акватории Баренцева моря. В донных осадках детектируемые количества радиоцезия обнаружены лишь у побережья Новой Земли. Оценка современного геоэкологического состояния фьордов восточной части Баренцева моря показала, что современные донные осадки Кольского залива отличаются наиболее высокой на Северо-Западе России концентрацией химических элементов, в том числе, токсичных микроэлементов и тяжелых металлов. В монографии было показано, как при определенных физико-химических условиях осадки могут привести к вторичному загрязнению акватории.

Кооперация ученых из разных областей океанологии в междисциплинарных исследованиях морских

систем интеллектуально полезна и имеет возрастающую практическую ценность. Поскольку Баренцево море – это рыбопромысловый район, крупная нефтяная провинция и важный транспортный морской путь, то до недавнего прошлого использование его ресурсов проводилось без особого внимания к широким воздействиям на морскую систему. Следует заметить, что в последнее десятилетие этот подход меняется.

Таким образом, на примере нашей монографии мы можем видеть, что «атлантификация» Баренцева моря в XXI веке привела к изменениям в системе атмосфера – криосфера (морской лед) – гидросфера

(море), также как это происходило в геологическом прошлом. Многокомпонентные геосистемы по-разному реагируют на текущие климатические изменения, имеют разную амплитуду реакции, а некоторые из них сохраняют прежние характеристики или их изменения пока не достаточно четко фиксируются. По нашему мнению, дальнейшие усилия исследователей необходимо направить на выявление сложных причинно-следственных связей между физической средой, живыми и биокосными системами, которые приблизят нас к пониманию направленности климатических изменений.