



Закисление Северного Ледовитого океана 2013: краткий обзор

АМАП

Программа арктического мониторинга и оценки (АМАП)

Использование в образовательных целях: Этот доклад, частично или полностью, как и другие продукты АМАП, доступные по адресу www.amar.no и на которые АМАП имеет авторские права, могут быть свободно использованы в качестве учебных материалов и для других учебных целей.

Единственное условие для такого использования – необходимость указывать, что АМАП является источником данных материалов в соответствии с рекомендованным способом цитирования.

В случае возникновения вопросов, связанных с использованием материалов в образовательных целях, пожалуйста, свяжитесь с Секретариатом АМАП (www.amar.no).

Примечание: Данный отчет может содержать материалы (например, фотографии), для которых будет необходимо получить разрешение на использование от оригинальных правообладателей.

Закисление Северного Ледовитого океана 2013: краткий обзор

АМАП

Программа арктического мониторинга и оценки (АМАП)

ЗАКИСЛЕНИЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА 2013: КРАТКИЙ ОБЗОР

© Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2014

Издатель

Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway (www.amap.no)

Цитирование

AMAP, 2014. Arctic Ocean Acidification 2013: An Overview. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xi + 27 pp.

Заказ

Этот отчет можно заказать в Секретариате АМАП, Gaustadalléen 21, N-0349 Oslo, Norway (amap@amap.no)

Этот отчет также опубликован как электронный документ доступный на веб-сайте АМАП

www.amap.no

Производство

Макетирование и техническая продукция

Burnthebook, United Kingdom (www.burnthebook.co.uk)

Фотография на обложке

Канадский бассейн, Северный Ледовитый океан. Ученый собирает крошечных амфипод со льдины.

Фото: Paul Nicklen / Getty Images

Напечатано

Narayana Press, Gylling, DK-8300 Odder, Denmark (www.narayanapress.dk).



Настоящее издание является переводом книги: Arctic Ocean Acidification 2013: An Overview (40 p.).

© Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2014. ISBN 978-82-7971-083-7. Все права защищены.

Русскоязычное издание осуществлено ГНЦ РФ Арктический и антарктический НИИ. Перевод на русский язык: канд. геогр. наук И.И. Пипко под редакцией канд. физ.-мат. наук А.В. Клепикова.

ISBN 978-5-98364-072-6

© ГНЦ РФ Арктический и антарктический
научно-исследовательский институт (перевод), 2016

Рабочая группа АМАП

Мортен Ольсен (Председатель, Дания), Рассел Ширер (заместитель Председателя, Канада),
Фред Врона (Канада), Микала Клинт (Дания), Оути Махонен (заместитель Председателя, Финляндия),
Хельги Дженссон (Исландия), Пер Долв (Норвегия), Туве Ландберг (Швеция),
Юрий Цатуров (заместитель Председателя, Россия), Том Армстронг (США).

Секретариат АМАП

Ларс-Отто Рейерсен, Саймон Уилсон, Йон Фуглестад, Ян-Рене Ларсен, Джанет Пауляк, Ингер Утне.

Государства-члены Арктического совета и Постоянные участники совета

Канада, Дания/Гренландия/Фарерские острова, Финляндия, Исландия, Норвегия, Россия,
Швеция, США, Международная ассоциация алеутов (AIA), Арктический совет атабасков (AAC),
Международный совет гвичинов (GCI), Приполярный Совет инуитов (ISS),
Российская Ассоциация коренных малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока
Российской Федерации (АКМНСС и ДВ РФ), Совет саамов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Helene Amundsen, Leif Anderson, Andreas Andersson, Kumiko Azetsu-Scott, Richard Bellerby (assessment lead), Michael Beman, Howard I. Browman, Craig Carlson, William W.L. Cheung, Melissa Chierici, Tonya Clayton, Sarah Cooley, Peter Croot, Nils Daan, Carlos Duarte, Sam Dupont, Maoz Fine, Ola Flaaten, Jan Helge Fosså, Agneta Fransson, Arild Gjertsen, Jason Hall-Spencer, Pamela Hallock-Muller, Jon Havenhand, Nathalie Hilmi, Grete K. Hovelsrud, Thomas P. Hurst, Debora Iglesias-Rodriguez, Emil Jeansson, Paul Knorr, Haruko Kurihara, Vicky W.Y. Lam, John Lisle, Robie Macdonald, Fred Mackenzie, Clara Manno, Jeremy Mathis, Sophie McCoy, Frank Melzner, Lisa Miller, Philip Munday, Jon Olafsson, Are Olsen, Ute Passow, Hans-Otto Pörtner, Lars-Otto Reiersen, Justin Ries, Lisa Robbins, Dominique Robert, Jeffrey Runge, Alain Safa, David Scott, Hein Rune Skjoldal, Nadja Steiner, U. Rashid Sumaila, Keita Suzuki, Carolyn Symon, Frede Thingstad, Simon Wilson, Tim Wootton, Michiyo Yamamoto-Kauai

ПРЕДИСЛОВИЕ

Этот обзор представляет собой краткое изложение первого комплексного оценочного доклада по закислению вод Северного Ледовитого океана (Arctic Ocean Acidification, далее АОА), подготовленного Программой арктического мониторинга и оценки (АМАП).

В подготовке оценочного доклада, научные результаты которой представлены в документе *Оценка АМАП 2013: Доклад о закислении Северного Ледовитого океана*¹, участвовали более 60 международных экспертов. Другие эксперты выполнили независимую проверку. При подготовке доклада команда экспертов АМАП выявила значительные пробелы в критически важных наборах данных и существующих научных знаниях.

На основе этой оценки, Рабочая группа АМАП разработала документы *Оценка закисления Северного Ледовитого океана: Основные выводы*² и *Оценка закисления Северного Ледовитого океана: Резюме для политиков*³. Основные выводы и соответствующие рекомендации, которые были представлены министрам Арктического совета на встрече в Кируне, Швеция, в мае 2013 г., воспроизведены в резюме, которое представлено на страницах ix–xi этого отчета. Ответ представителей Арктического совета на уровне министров приведен в цветном поле на странице xi.

Данный документ, *Закисление Северного Ледовитого океана 2013: краткий обзор* также выполнен под руководством Рабочей группы АМАП и представляет собой резюме *Доклада о закислении Северного Ледовитого океана 2013* и его основные результаты, приведенные на стр. 26. Обзор включает в себя предложения по распространению знаний о закислении Северного Ледовитого океана и его возможных последствиях для народов Арктики (см. стр. 25).

Основанный на публикациях и прошедший независимую экспертизу доклад *Оценка АМАП 2013: Доклад о закислении Северного Ледовитого океана* представляет научную основу для большей части информации и графиков*, представленных в этом докладе. Данный доклад о закислении океана дополняет предыдущие оценки арктического изменения климата, выполненные АМАП, включая *Оценку воздействия на климат Арктики*⁴ и *Снег, вода, лед и вечная мерзлота в Арктике*⁵ (далее СВИПА).

В примечаниях указывается, где этот обзор включает в себя информацию из оценки СВИПА. Элементы данного доклада, которые были обновлены в свете новой информации Первой Рабочей группы Пятого оценочного доклада Межправительственной группы экспертов по изменению климата, МГЭИК⁶, также помечены сносками.

Отчет о закислении Северного Ледовитого океана был представлен научному сообществу на Международной конференции «Закисление Северного Ледовитого океана», состоявшейся в Бергене, Норвегия, в мае 2013 г. (презентации доступны на сайте www.ustream.tv/channel/aoa-conference). Другие информационные материалы АМАП, связанные с АОА, включают фильмы⁷, обобщающие основные результаты доклада АОА и предназначенные для политиков, преподавателей и студентов. Все материалы, касающиеся оценочного доклада по закислению вод, можно получить в Секретариате АМАП и на сайте АМАП (www.amap.no).

АМАП выражает свою признательность всем экспертам, посвятившим этой работе свое время и усилия и предоставившим данные для подготовки оценочного доклада, а особенно его ведущим авторам. Особая благодарность автору научно-популярной литературы Тоне Клейтон за ее помощь в преобразовании обширного научного материала в сжатый обзор. Поддержка арктических и неарктических стран, осуществляющих научные исследования и мониторинг в Арктике, является жизненно важной для успеха АМАП. Работа АМАП основана, в первую очередь, на текущей деятельности в этих странах, которые также оказали необходимую поддержку большинству экспертов, участвовавших в подготовке оценочного доклада. В частности, АМАП хотела бы поблагодарить Канаду, Норвегию и Совет Министров Северных Стран за финансовую поддержку работы по подготовке доклада, а также спонсоров программ и проектов, которые предоставили данные для использования докладе.

Рабочая группа АМАП с удовольствием представляет этот доклад Арктическому совету и широкой общественности.

Вспомогательные и связанные с докладом документы

¹ АМАП, 2013. АМАП Assessment 2013: Arctic Ocean Acidification. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. viii+99pp.

² АМАП, 2013. Arctic Ocean Acidification Assessment: Key Findings www.amap.no/documents/doc/amap-arctic-ocean-acidification-assessment-key-findings/809

³ АМАП, 2013. АМАП Arctic Ocean Acidification Assessment: Summary for Policymakers www.amap.no/documents/doc/amap-arctic-ocean-acidification-assessment-summary-for-policy-makers/808

⁴ ACIA, 2005. Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press. 1020 pp.

⁵ АМАП, 2011. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. xii + 538 pp.

⁶ Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC); Climate Change 2013: The Physical Science Basis

⁷ Arctic Ocean Acidification (film) www.amap.no/documents/doc/arctic-ocean-acidification-2013-full-version/803

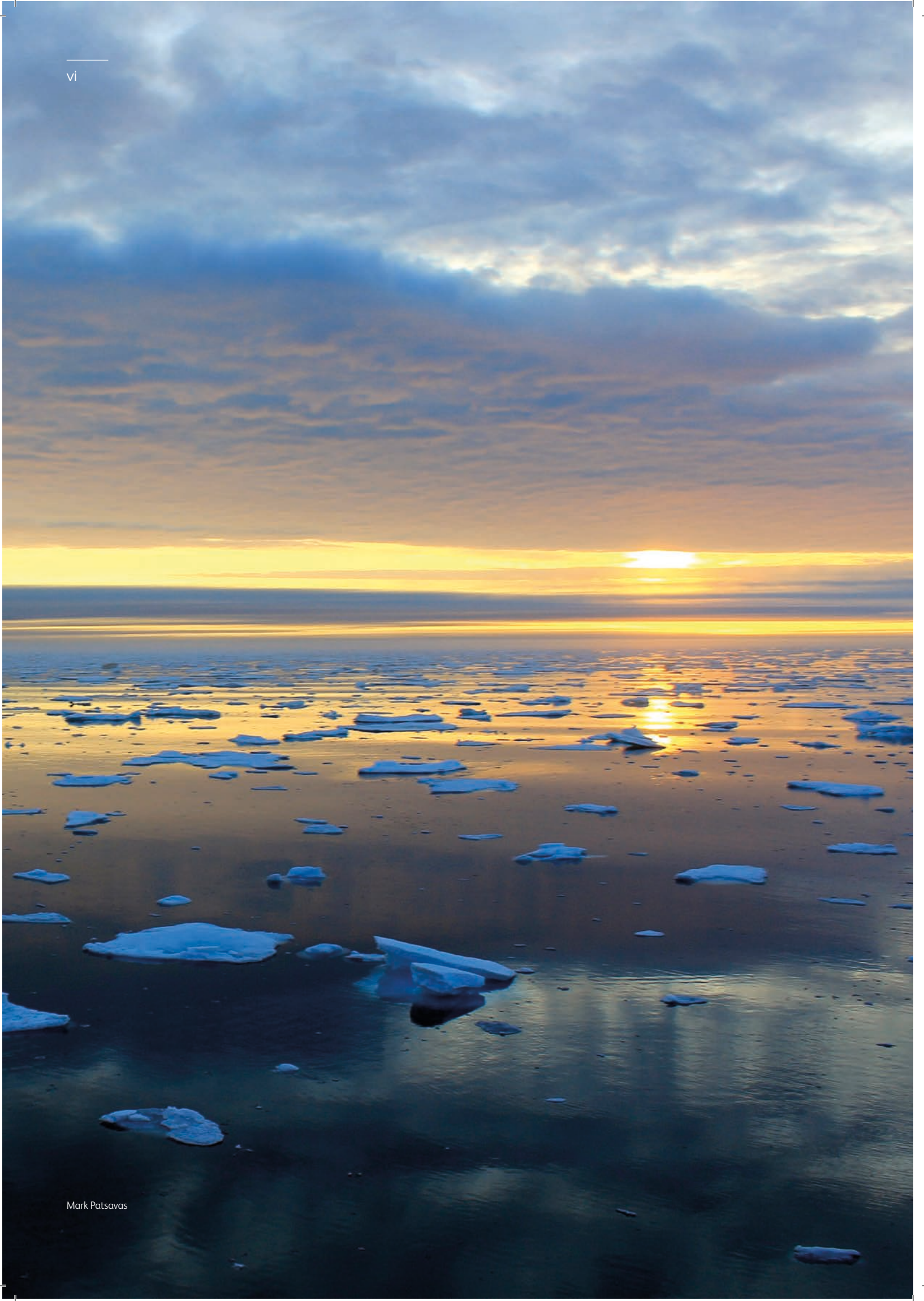
* Дополнительные источники графических материалов в этом докладе

Стр. 9: круговые диаграммы. Данные из: globalcarbonproject.org.

Стр. 9: графики временной зависимости. Модифицированы на основе графиков из: M. Steinacher and others (2009) Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model, *Biogeosciences* 6:515-533, and M. Yamamoto-Kawai and others (2011) Effects of ocean acidification, warming, and melting of sea ice on Ω of Canada Basin surface water, *Ecosystem Studies of Sub-Arctic Seas 2011 Open Science Meeting*.

Стр. 12: график. Модифицировано на основе графика из: Doney and others (2009) Ocean acidification: The other CO₂ problem, *Annual Review of Marine Science* 1:169-192.

Стр. 15: график временной зависимости. Взято из: D. Archer (2009) The Long Thaw: How Humans Are Changing the Next 100,000 Years of Earth's Climate.



СОДЕРЖАНИЕ

БЛАГОДАРНОСТИ	iii
ПРЕДИСЛОВИЕ	v
ЗАКИСЛЕНИЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА – РЕЗЮМЕ 2013	ix
ЯЗЫК ЗАКИСЛЕНИЯ ОКЕАНА	1
ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА – АРКТИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА	2
ОСОБЫЙ СЛУЧАЙ УЯЗВИМОСТИ АРКТИКИ	4
СВИДЕТЕЛЬСТВА ЗАКИСЛЕНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА	5
ПРИЧИНЫ ЗАКИСЛЕНИЯ ВОД СЛО	8
ИЗМЕНЧИВОСТЬ АРКТИКИ: ПОСТОЯННО МЕНЯЮЩАЯСЯ МОЗАИКА	12
ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ	14
ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОЙ МОРСКОЙ ЖИЗНИ	17
ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ АРКТИКИ	21
ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО РЫБОЛОВСТВА	22
ПРОБЕЛЫ В ЗНАНИЯХ И МЕРЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ: СЛЕДУЮЩИЕ ШАГИ	25

ЗАКИСЛЕНИЕ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА РЕЗЮМЕ 2013

ЗАКИСЛЕНИЕ ВОД СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Ключевой результат 1

Происходит крупномасштабное и быстрое закисление арктических морских вод

Ученые зафиксировали значительные темпы подкисления вод в некоторых районах Северного Ледовитого океана (СЛО). Например, в Северных морях закисление происходит в широком диапазоне глубин – наиболее интенсивно в поверхностных водах и более медленно в глубоких водах. Снижение pH морской воды со скоростью 0.02 ед. pH за десятилетие наблюдается с конца 60-х годов прошлого века в Исландском и Баренцевом морях. Выраженные химические эффекты, связанные с закислением вод, обнаружены в поверхностных водах Берингова пролива и в Канадском бассейне СЛО.

Ключевой результат 2

Основная движущая сила закисления океана – поглощение углекислого газа, выделяемого в атмосферу в результате антропогенной деятельности

Когда обогащенные углеродом вещества, такие как уголь или нефть, сжигаются (например, на электростанциях), углекислый газ выделяется в атмосферу. Некоторая часть этого газа поглощается океанами, замедляя его накопление в атмосфере и, следовательно, темпы антропогенного потепления климата, но в то же время увеличивая кислотность морской воды. В результате антропогенных выбросов двуокиси углерода в атмосферу средняя кислотность поверхностных вод Мирового океана сейчас приблизительно на 30% выше, чем до начала индустриальной революции.

Ключевой результат 3

Воды Северного Ледовитого океана особенно подвержены закислению

Благодаря огромному количеству пресных вод, поступающих в океан с речным стоком и в результате таяния льда, воды СЛО менее эффективны в химической нейтрализации закисления вод углекислым газом, и приток пресных вод будет увеличиваться с потеплением климата. Кроме того, воды СЛО характеризуются низкой температурой, что способствует переносу углекислого газа из атмосферы в океан. В результа-

те этих комбинированных воздействий арктические воды являются наиболее чувствительными в контексте закисления в ответ на повышение уровня углекислого газа в атмосфере. Происходящее и прогнозируемое значительное сокращение ледового покрова в Арктике летом означает, что площадь открытой воды растет с каждым годом, что, в свою очередь, приводит к увеличению потока углекислого газа из атмосферы в океан.

Ключевой результат 4

Закисление вод Северного Ледовитого океана неоднородно

Наряду с поглощением углекислого газа морской водой, другие процессы могут также играть важную роль в определении темпов и масштабов закисления океана. Например, реки, морские донные отложения и береговая эрозия также поставляют органический материал, который бактерии могут преобразовать в углекислый газ, усугубляя закисление океанических вод, особенно на мелководном континентальном шельфе. Морской ледовый покров, поступление пресных вод, рост и разложение растений также могут локально влиять на закисление океана. Вклад этих процессов изменяется не только от места к месту, но и сезона к сезону и из года в год. Результатом является сложное, неравномерное, постоянно меняющееся мозаичное состояние закисления арктических вод.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОТКЛИКИ НА ЗАКИСЛЕНИЕ ВОД

Ключевой результат 5

Арктические морские экосистемы, весьма вероятно, подвергаются значительному изменению из-за закисления океана

Арктические морские экосистемы в целом характеризуются короткими, простыми пищевыми цепями, с энергией, поступающей всего в несколько этапов от маленьких растений и животных к большим хищникам, таким как птицы и тюлени. Целостность такой простой структуры во многом зависит от ключевых видов, таких как арктическая треска. Крылоногие (птероподы или морские бабочки) и иглокожие (морские звезды, морские ежи) являются ключевыми организмами пищевой цепи, которые могут быть чувствительны к подкислению океана. Лишь небольшое количество данных доступно в настоящее время для оценки точного характера и степени уязвимости арктической экосистемы, так как большинство биологических исследований было проведено в других регионах океана. Крайне необходимы сфокусированные долгосрочные исследования в Арктике.

Ключевой результат 6

Закисление океана будет иметь прямые и косвенные последствия для арктических морских обитателей. Вполне вероятно, что некоторые морские организмы будут положительно реагировать на новые условия, связанные с закислением океана, в то время как другие будут в невыгодном положении, и, возможно, близки к локальному исчезновению

Примеры прямого воздействия включают в себя изменения в скорости роста или поведении. Наиболее изученные прямые эффекты включают воздействие на формирование раковин и рост организма: эксперименты показывают, что многие животные растут более медленно при уровнях закисления, прогнозируемых на ближайшие столетия. Некоторые виды водорослей, напротив, процветают в таких условиях. Косвенные эффекты включают в себя изменения в доступности пищи или других ресурсов. Например, птицы и млекопитающие, возможно, напрямую независимые от закисления, могут быть косвенно затронуты, если источники их питания уменьшатся, расширятся, изменят место обитания, или трансформируются иным образом в ответ на закисление океана. Закисление океана также может изменить степень доступности для морских организмов питательных веществ и необходимых микроэлементов из морской воды.

Закисление океана, скорее всего, будет влиять отрицательно на некоторых строящих раковины арктических моллюсков, особенно на ранних этапах жизни. Ожидается, что растущие и взрослые рыбы, скорее всего, справятся с уровнями закисления, прогнозируемыми в течение следующего столетия, но икра и личинки на ранней стадии развития могут быть более чувствительны. Как правило, организмы на ранних стадиях жизни более восприимчивы к прямому воздействию закисления океана, чем на более поздних. Организмы, живущие в условиях значительных колебаний кислотности морской воды, могут оказаться более устойчивыми к закислению океана, чем организмы, привыкшие к более стабильной обстановке.

Ключевой результат 7

Влияние закисления океана следует оценивать в контексте других изменений, происходящих в арктических водах

Арктические морские организмы подвергаются воздействию не только закисления океана, но одновременно и других значительных изменений. К ним можно отнести изменения климата (которые кардинально меняют физические, химические и биологические условия), промышленное рыболовство, деградацию среды обитания и загрязнение окружающей среды. Экологические взаимодействия, например, между хищниками и добычей, среди конкурентов в борьбе за пространство или другие ограниченные ресурсы, также играют важную роль в формировании океанических сообществ. Так как различные формы морской жизни реагируют на изменения окружающей среды

различными способами, соотношение растений и животных в сообществе будет меняться, как и их взаимодействие друг с другом. Понимание сложных и часто непредсказуемых воздействий комбинированных изменений окружающей среды на арктические организмы и экосистемы остается основным пробелом в существующих знаниях.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАКИСЛЕНИЯ ОКЕАНА НА АРКТИЧЕСКИЙ РЫБНЫЙ ПРОМЫСЕЛ

Ключевой результат 8

Закисление океана является одним из нескольких факторов, которые могут способствовать изменению видового состава рыб в Северном Ледовитом океане

Закисление океана может повлиять на обилие, продуктивность и распределение морских видов, но величина и направление таких изменений остаются неопределенными. Другими процессами, определяющими изменения в Арктике, являются повышение температуры, уменьшение площади морского льда и распреснение поверхностных вод.

Ключевой результат 9

Закисление океана может влиять на рыбный промысел в Северном Ледовитом океане

Выполнено несколько исследований, оценивающих социально-экономические последствия закисления океана для рыболовства, и большинство из них сосредоточено, в основном, на моллюсках, а также на регионах за пределами Арктики. Количество, качество и потенциал коммерчески важных арктических рыбных запасов могут быть затронуты закислением океана, но величина и направление таких изменений являются неопределенными. Рыбные запасы могут быть более устойчивы к закислению океана, если другие стрессы (например, чрезмерный вылов рыбы и деградация среды обитания) будут сведены к минимуму.

Ключевой результат 10

Изменения экосистемы, связанные с закислением океана, могут повлиять на уровень жизни северных народов

Морские виды, являющиеся объектом промысла северных прибрежных общин, вероятно, будут затронуты закислением океана. Большинство групп коренного населения занимается выловом широкого спектра морских организмов и способно перейти к большей зависимости от непораженных видов. Такое изменение

может повлиять на некоторые сезонные или культурные привычки. Любительский лов рыбы также может изменить свой состав. Морские млекопитающие, важные для культуры, рациона питания и жизнедеятельности коренных народов и других жителей Арктики, также могут быть косвенно затронуты за счет изменения доступности пищи:

ЧТО ДОЛЖНО БЫТЬ СДЕЛАНО

Что могут сделать государства и члены Арктического Совета, чтобы решить эту серьезную проблему для нашего будущего?

Благодаря тому, что более четверти мировых выбросов двуокси углерода в результате сжигания ископаемого топлива приходится на государства Арктического совета, Арктический совет имеет возможность обеспечить лидерство в решении глобальной проблемы закисления океана. Научные доказательства делают все более очевидной необходимость принятия мер по сокращению выбросов углекислого газа, чтобы замедлить закисление вод Северного Ледовитого океана.

Биологические, социальные и экономические последствия закисления океана потенциально значимы для арктических стран и их населения, а также для мирового сообщества. Воздействие закисления океана на морские экосистемы и северные сообщества, вероятно, будет иметь значительные последствия, в особенности для развития рыболовства и потенциально для добычи морских млекопитающих и морского туризма. В данных областях остаются большие пробелы в знаниях, что в настоящее время препятствует созданию надежных прогнозов таких последствий.

Исходя из основных выводов научного доклада по закислению Северного Ледовитого океана, Рабочая группа АМАП согласовала следующие рекомендации:

РЕКОМЕНДАЦИИ АРКТИЧЕСКОМУ СОВЕТУ

1. Призвать государства-члены совета, страны-наблюдатели и мировое сообщество в срочном порядке уменьшить выбросы углекислого газа.
2. Призвать активизировать научные исследования и мониторинг, которые расширят понимание процессов закисления и их влияния на арктические морские экосистемы и зависящие от них северные сообщества.
3. Призвать государства-члены совета осуществлять стратегии адаптации, способные охватить все аспекты арктических изменений, включая закисление океана, с учетом локальных и общественных потребностей



КИРУНСКАЯ ДЕКЛАРАЦИЯ: РЕАКЦИЯ НА ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА

Весной 2013 г. на совещании министров в г. Кируна, Швеция, были представлены основные результаты оценочного доклада АМАП 2013 *Закисление Северного Ледовитого океана* и связанные с ними рекомендации Рабочей группы АМАП.

В ответ министры арктических стран утвердили оценку АМАП *Закисление Северного Ледовитого океана* и рекомендации Рабочей группы.

Декларация Арктического совета, подписанная на уровне министров 15 мая 2013 г. в Кируне, включает в себя следующее:

«Мы, министры, представляющие восемь арктических государств, к которым присоединились представители шести организаций – постоянных участников Арктического совета, собрались в г. Кируна, Швеция, на восьмую министерскую сессию стран-членов Арктического Совета по случаю завершения двухлетнего председательства Швеции в Совете ... настоящим...

Одобряем доклад *Закисление Северного Ледовитого океана*, **утверждаем** его рекомендации, с озабоченностью **отмечаем** возможные воздействия закисления на морских обитателей и людей, которые зависят от здоровья морских экосистем, **признаем**, что сокращение выбросов углекислого газа является единственным эффективным способом уменьшения закисления океана, и **просим** Арктические государства продолжать принимать меры по смягчению последствий и адаптации, а также по контролю и оценке степени закисления Северного Ледовитого океана».



Морской лед в море Лабрадор

ЯЗЫК ЗАКИСЛЕНИЯ ОКЕАНА

Язык закисления на первый взгляд может показаться непонятным. Вот несколько основных терминов:

Ионы водорода существуют в морской воде, в крови и в большинстве жидкостей. Химия морской воды и многие биологические процессы чувствительны к ионам водорода. Ионы водорода обозначаются H^+ .

Кислотность является мерой того, сколько ионов водорода находится в данном объеме жидкости. Чашка лимонного сока имеет более высокую кислотность (содержит больше ионов водорода), чем чашка черного кофе. Современная поверхностная океаническая вода имеет более высокую кислотность, чем поверхностная вода доиндустриального периода.

Один из удобных способов выразить кислотность – использовать показатель **pH**¹. Чем больше кислотность жидкости, тем ниже ее pH. Небольшое изменение pH эквивалентно большому изменению кислотности. Среднее значение pH поверхностных вод Мирового океана в настоящее время составляет около 8.1.

Закисление означает увеличение количества ионов водорода в данном объеме жидкости. Мы можем подкислить стакан водопроводной воды, добавив лимонный сок.

Закисление океана – постепенное увеличение кислотности океанических вод в течение длительного периода, обычно нескольких десятилетий или дольше. В настоящее время мы закисляем океаны, добавляя большое количество углекислого газа.

«Кислый» – это термин, используемый для описания жидкостей, которые содержат больше определенного количества ионов водорода. Жидкости с pH менее 7 считаются «кислыми». Молоко слегка кислое, аккумуляторная кислота – сильно кислая. Типичная морская вода не является кислой.

Определение **«коррозионный»** в контексте закисления океана, как правило, относится к водам, способным растворять **аррагонит**, форму карбоната кальция (минерала), используемую некоторыми морскими организмами для строительства раковин или скелетов. Коррозионная по отношению к арагониту морская вода не растворяет другие материалы, например, водоросли, рыбью чешую или человеческую кожу.

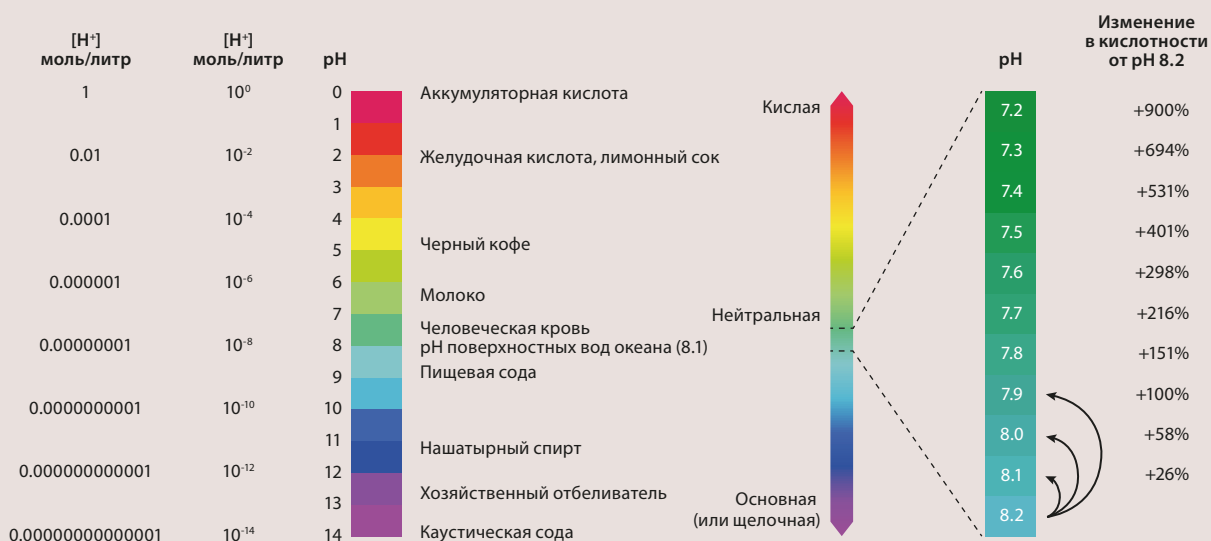
Глобальное закисление океана происходит сейчас. С доиндустриального периода кислотность поверхностных вод океана увеличилась примерно на 30%².

Ученые не ожидают, что закисление приведет к полностью кислой океану. Некоторые океанические воды могут переходить «кислый» порог (pH 7) несколько раз в году, но основная часть вод океана – нет. Даже если бы мы сожгли все ископаемое топливо Земли, мы бы не сделали весь океан кислым.

Ученые обеспокоены экологическими последствиями быстро растущей кислотности. В древности многие виды вымерли в связи с эпизодами закисления океана. Современное закисление происходит в быстром темпе. Кроме того, сегодня закисление сопровождается многими другими крупномасштабными изменениями климата Земли, химии и биологии (например, увеличением температуры и уменьшением площади морского льда). Социальные и экономические изменения (например, урбанизация и развитие новых рыболовных технологий) также оказывают влияние на океаны. Такое необычное сочетание быстро изменяющихся условий может представлять особую проблему для морской жизни

¹ В математическом выражении $pH = -\log [H^+]$, где символ $[H^+]$ обозначает концентрацию ионов водорода

² Согласно докладу Рабочей группы I МГЭИК, величина pH поверхностных вод океана с начала индустриальной эры снизилась на 0.1 ед. pH, что соответствует увеличению концентрации ионов водорода на 26%.



ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА – АРКТИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА

В АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ВОДАХ ПРОИСХОДИТ
КРУПНОМАСШТАБНОЕ И БЫСТРОЕ ЗАКИСЛЕНИЕ.
ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА ПОВЛИЯЕТ НА МОРСКУЮ ЖИЗНЬ
В АРКТИКЕ



Образ жизни в Арктике меняется.

Температура воздуха и океана растет. Морской и материковый лед тает. Речной сток растет. Вечная мерзлота оттаивает. Арктические берега разрушаются. Изменяются методы рыболовства и охоты.

Менее очевидное, но важное изменение происходит в море: **кислотность вод наших океанов растет быстрее, чем когда-либо прежде в истории человечества.**

Эти изменения важны потому, что кислотность ¹ сильно влияет на многие химические и биологические процессы, важные для растений, животных, а также для человека. Химический состав морской воды сегодня существенно отличается от ее состава не только два столетия, но даже два десятилетия назад. Похоже, что темпы изменений сейчас быстрее, чем в любое другое время в течение последних 55 млн лет.

Измерения показывают, что кислотность морской воды повышается и в Северном Ледовитом океане², и во всем Мировом океане. Этот тип химических изменений – повсеместное и постоянное увеличение кислотности морской воды – известен как *закисление океана*.

По сравнению с другими океанами **Северный Ледовитый океан особенно чувствителен к закислению.** Примеры этой чувствительности и доказательства закисления арктических морских вод представлены ниже на стр. 4–7.

Основная **причина** закисления океана такая же, как и основная причина современного потепления Арктики и таяния льда, а именно: рост содержания **углекислого газа** в атмосфере Земли.

Большая часть этого углекислого газа поглощается океанами и химическим результатом является закисление океана. Локальные процессы, включая изменение климата Арктики, также могут влиять на уровень углекислого газа в морской воде. Более подробную информацию о связях диоксида углерода и изменения климата с закислением вод Северного Ледовитого океана можно найти на стр. 8–11.

Биологические эффекты закисления океана гораздо труднее оценить, чем химические. Бесспорно, что многие из сегодняшних арктических морских растений и животных обитают в морской воде со значительно более высокой кислотностью, чем предыдущие поколения. Столь же очевидным является тот факт, что будущие поколения будут жить в морской воде, имеющей еще более высокую кислотность. Современное мозаичное закисление Северного Ледовитого океана, а также его текущие и будущие тенденции обсуждаются на стр. с 12 по 15.



Pernilla Carlsson

Лабораторные эксперименты и полевые наблюдения демонстрируют широкий спектр реакций растений и животных на закисление океана. Некоторые организмы реагируют негативно, а некоторые – позитивно. Некоторые не демонстрируют прямого отклика. Некоторые из этих результатов являются более точными, а некоторые более понятными, чем другие. Научные результаты, относящиеся к воздействию закисления океана на различные типы арктических растений и животных, приведены на стр. 16–19.

Так как закисление океана происходит одновременно с другими крупными изменениями в Арктике (например, с потеплением океана, уменьшением площади и объема морского льда), отделить или прогнозировать последствия какого-либо одного фактора трудно. Но с уверенностью можно сказать, что арктические **морские экосистемы** чувствительны к закислению океана. Причины этого изложены на стр. 20–21.

Оценка **потенциальных последствий для человека** является особенно сложной задачей. Многого еще неизвестно о последствиях закисления океана для морских организмов, а дополнительный учет человеческого и экономического факторов делает клубок еще запутанней. Некоторые предположения экспертов и предварительные выводы, касающиеся социальных и экономических последствий закисления Северного Ледовитого океана, представлены на стр. 22–24.

¹ Объяснение «кислотности» и связанных с ней терминов – см. стр. 1.

² В этом докладе термин «Северный Ледовитый океан» относится не только к центральному бассейну Северного Ледовитого океана, но и к его окраинным морям

ОСОБЫЙ СЛУЧАЙ УЯЗВИМОСТИ АРКТИКИ

С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ РЕАКЦИИ НА ЗАКИСЛЕНИЕ, ВОДЫ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ЯВЛЯЮТСЯ ОДНИМИ ИЗ НАИБОЛЕЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ

Предыдущие оценочные доклады АМАП показали, что Арктика является особенно чувствительной к воздействию широкого спектра глобальной деятельности человека. Закисление океана не является исключением.

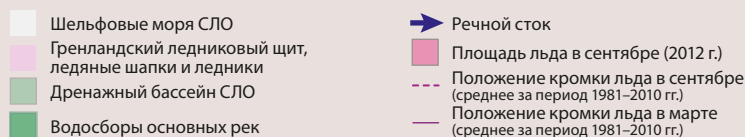
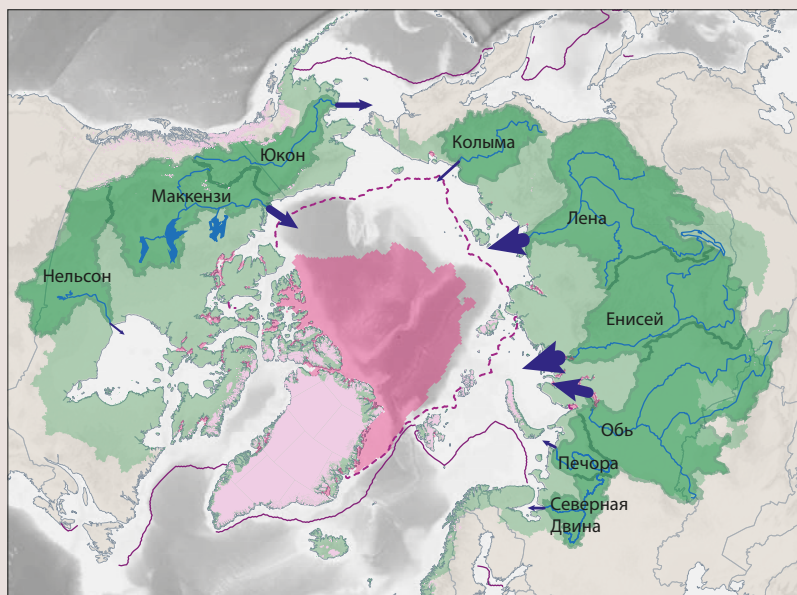
Северный Ледовитый океан фактически является высокоширотным эстуарием, который проходит через Северный полюс и окружен со всех сторон сушей. Это обстоятельство формирует особый характер Северного Ледовитого океана – в том числе, особую уязвимость из-за поглощения углекислого газа и закисления вод.

▼ Северный Ледовитый океан составляет только 1% от объема Мирового океана, но получает около 11% общего речного стока. На огромные континентальные шельфы приходится половина его площади. На этой карте большие стрелки соответствуют большему объему речного стока.

- Северный Ледовитый океан **холодный**, что способствует переносу углекислого газа из атмосферы в океан.
- Северный Ледовитый океан получает большое количество пресной воды со стоком рек и в результате таяния льда. Менее соленая морская вода не столь эффективна, как соленая морская вода в химической нейтрализации подкисляющего действия углекислого газа. Разбавление пресной водой также снижает доступность некоторых основных компонентов, необходимых для построения определенных типов раковин и скелетов.

Некоторые дополнительные точки уязвимости Северного Ледовитого океана:

- Площадь арктического **морского льда** уменьшается. В результате сокращения постоянного ледового покрова, все большие площади океана взаимодействуют с обогащенной углекислым газом атмосферой.
- Реки, береговая эрозия и подводная мерзлота поставляют огромные количества содержащего углерод **органического материала** в море. Морские бактерии могут превратить этот некогда живой материал в подкисляющий воду углекислый газ.
- **Глубинные воды**, по своей природе имеющие высокую кислотность, в некоторых районах поднимаются с океанических глубин на внешний шельф. Часть поднимающихся вод может быть коррозионной¹ по отношению к некоторым видам ракушек, лишенных защитного покрытия.
- В некоторых районах шельфа со дна моря просачивается газообразный метан. Этот богатый углеродом газ может вступать в реакцию с кислородом, образуя углекислый газ.
- **Арктические экосистемы** характеризуются низким биоразнообразием и простыми пищевыми цепями. Такие структуры более подвержены разрушению, чем более сложные механизмы.
- Арктические морские организмы подвергаются воздействию не только быстрого закисления океана, **но и других важных изменений в окружающей среде**. Например, морской ледовый покров уменьшается и поверхностные воды становятся заметно более теплыми и менее солеными.
- Коренные народы Арктики во многом зависят от **традиционных местных продуктов питания**. Эта зависимость делает местные общины потенциально уязвимыми к уменьшению количества традиционной пищи. Такие изменения могут иметь ментальные и культурные последствия.



Благодаря совокупному влиянию возрастающей концентрации диоксида углерода и потепления климата, Северный Ледовитый океан является **одним из первых**, где уже существуют большие площади «**коррозионных**» поверхностных и подповерхностных вод – то есть вод, способных растворять некоторые распространенные формы материала раковин. Ученые ожидают, коррозионные зоны будут расширяться в ближайшие годы.

¹ Объяснение данного употребления термина «коррозионный» – см. стр. 1.



© Nick Cobbing / Greenpeace

СВИДЕТЕЛЬСТВА ЗАКИСЛЕНИЯ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

Северный Ледовитый океан является труднодоступным местом и его сложно исследовать. По этой причине, измерения в арктических морских водах эпизодичны и неравномерны по сравнению с другими океанскими районами. Особенно мало данных для зимнего сезона.

Тем не менее, все больше доказательств того, что в Северном Ледовитом океане происходит **быстрое повышение кислотности вод** и его влияние **расширяется**.

ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА

Термин *закисление океана* означает просто увеличение кислотности морской воды в течение длительного периода времени, обычно несколько десятилетий или больше. Некоторое закисление океана происходит естественно. *Антропогенное закисление вод океана* относится к той части повышения кислотности, которая обусловлена деятельностью человека.

Сейчас происходит значительное **глобальное закисление океана**. Современное закисление океана характерно тем, что:

- происходит быстро – быстрее, чем в любое другое время в течение последних 55 млн лет;
- появилось впервые в истории человечества;
- вызвано деятельностью человека

Основной причиной современного закисления океана является углекислый газ, образующийся в результате

УЧЕННЫЕ ДОКУМЕНТАЛЬНО ПОДТВЕРДИЛИ ЗНАЧИТЕЛЬНОЕ ЗАКИСЛЕНИЕ АРКТИЧЕСКИХ МОРСКИХ ВОД

сжигания ископаемого топлива. Этот и другие дополнительные факторы, определяющие закисление вод, обсуждаются более подробно на стр. 8–11.

Закисление океана является проблемой, так как (а) кислотность морской воды влияет на множество химических реакций, которые важны для жизни в океане, и (б) закисление океана происходит наиболее сильно в верхнем слое, где обитает большинство морских организмов. Некоторые биологические проблемы, касающиеся закисления океана, обсуждаются на стр. 16–21.

Ученые обнаружили признаки закисления вод во многих районах Мирового океана, в том числе, в Северном Ледовитом океане. Северный Ледовитый океан фактически находится на переднем крае этих драматических химических изменений.

Наблюдения увеличения кислотности морских вод

► Наблюдаемые величины рН и степени насыщения вод арагонитом в арктических морях. Более низкие величины рН указывают на более высокую кислотность. Величины степени насыщения вод арагонитом ниже 1.0 означают, что воды являются коррозионными по отношению к арагониту.

Одни из самых ярких доказательств закисления Северного Ледовитого океана обнаружены в Исландском и Норвежском морях. Повторные измерения показывают тенденцию быстрого роста кислотности (то есть, снижения рН) в поверхностных водах в последние годы. Исторические данные за три десятилетия свидетельствуют об аналогичной тенденции в Баренцевом море.

В некоторых районах океанические воды характеризуются большими колебаниями в кислотности, но общая тенденция неочевидна. Примерами тому являются поверхностные воды Берингова и Гренландского морей. Долгосрочные тенденции трудно обнаружить и в тех регионах, где отбор проб осуществляется нерегулярно.

Закисление наиболее интенсивно происходит в поверхностных водах, но, в зависимости от направления течений в океане, может достигать и более глубоких горизонтов.

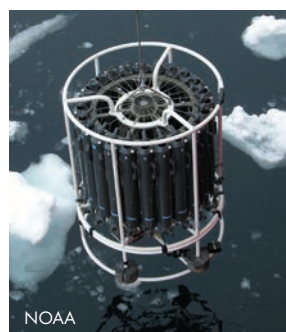
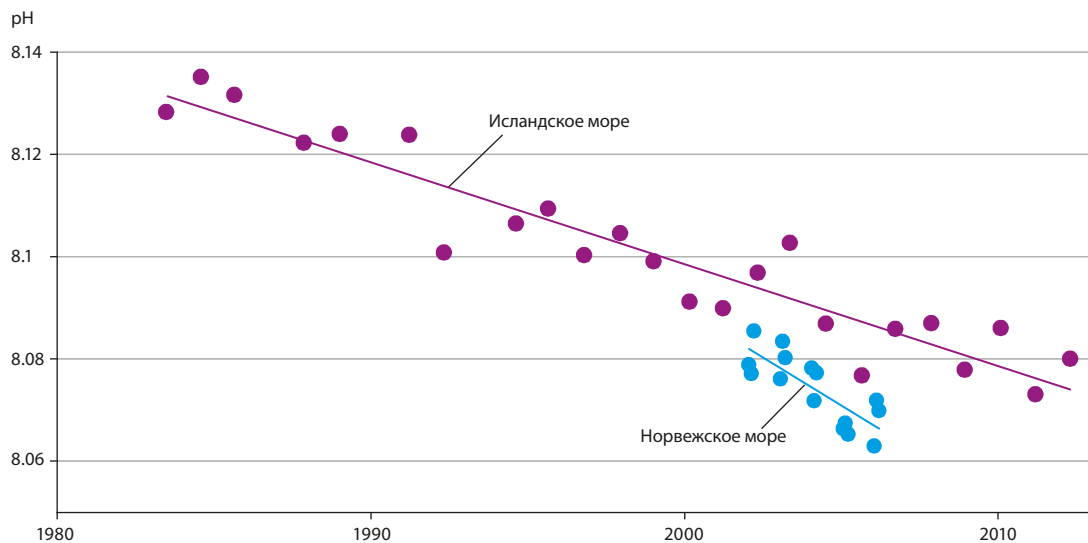
Закисление очевидно, например, в глубинных водах Исландского моря. Но темпы изменений в этих водах медленнее, чем в водах, более близких к поверхности океана.

Тренды, зафиксированные в арктических водах, соответствуют данным, полученным в последние десятилетия во многих районах Мирового океана.

Регион	рН	Степень насыщения арагонитом
Северные моря		
Поверхность	8.1–8.4	1.5–3.5
Дно	7.9–8.3	0.7–2.2
Берингово море		
Поверхность	7.9–8.3	0.7–2.9
Дно	7.0–7.7	0.1–2.0
Сибирский шельф		
Поверхность ^а	7.5–8.1	0.2–2.5
Дно	7.4–7.9	0.2–1.4
Шельф морей Чукотского и Бофорта		
Поверхность	7.9–8.4	0.8–2.0
Дно	7.8–8.1	0.8–2.0
Канадский архипелаг		
Поверхность	8.0–8.3	0.8–2.2
Дно	7.6–8.1	0.6–1.4
Центральный бассейн СЛО		
Поверхность	8.0–8.2	1.3–1.8
Глубже 2000 м	~8.1	0.6–1.0

^а Включая данные, полученные вблизи устьев рек

► В последние годы кислотность поверхностных вод в некоторых районах Арктики увеличилась (на что указывает снижение рН).





Steve Gschmeissner / Science Photo Library

СТЕПЕНЬ НАСЫЩЕНИЯ ВОД АРАГОНИТОМ

Наиболее простой способ увидеть закисление океана заключается в проведении многократных измерений кислотности морской воды. Другой вариант – *оценить степень насыщения вод карбонатом кальция.*

Карбонат кальция – минерал, производимый многими арктическими организмами для постройки раковин или скелетов. Степень насыщения представляет собой величину, характеризующую химическую склонность морской воды к формированию или растворению карбоната кальция.

Закисление океана снижает степень насыщения вод карбонатом кальция. Такое же влияние оказывает поступление в морскую воду пресных вод или органического материала в результате таяния льда или с речным стоком.

Низкая степень насыщения вод карбонатом кальция, по-видимому, представляет собой проблему для многих, но не всех, растений и животных, производящих карбонат кальция. Очень низкая степень насыщения указывает на то, что морская вода способна растворять карбонат кальция.

В Арктике ученые уделяют особое внимание **степени насыщения вод арагонитом**, потому что арагонит – это широко используемая и относительно более растворимая форма карбоната кальция. Примерами арктических организмов, которые производят арагонит, являются птероподы (морские бабочки) и кораллы.

Воды со степенью насыщения арагонитом меньше 1.0 являются **«коррозионными»**, то есть способными растворять арагонит раковин и скелетов, не защищенных от контакта с морской водой (например, защитным покрытием). Примеры величин степени насыщения арктических вод арагонитом приведены в таблице на стр. 6.

В последние годы исследователи обнаружили **уменьшение степени насыщения вод арагонитом** и расширение коррозионных зон в нескольких районах Мирового океана, включая Северный Ледовитый океан.

Результаты наблюдений увеличения коррозионного потенциала

Одни из самых ярких арктических изменений наблюдаются в Канадском бассейне. Ученые, изучавшие эту область в 1997 г., не выявили на поверхности океана коррозионных вод, но результаты последующих работ, выполненных в 2008 г. и позже, показали, что поверхностные воды стали чрезвычайно агрессивными по отношению к арагониту. Канадская котловина стала первой глубоководной океанической зоной, где ученые нашли на поверхности обширные зоны коррозионных вод.

В Исландском море насыщение вод арагонитом также стремительно снижается синхронно с увеличением кислотности. Значительные участки придонных вод переходят от неагрессивных к коррозионным условиям.

Ученые также обнаружили коррозионные воды в поверхностном и подповерхностном слоях в море Лаптевых и на востоке Восточно-Сибирского моря, на шельфе морей Чукотского и Бофорта, а также в Канадском архипелаге. В Чукотском и Беринговом морях коррозионные от природы подповерхностные вод иногда поднимаются к поверхностной биологически активной зоне.

Даже без влияния человека, степени насыщения арктических вод карбонатом кальция являются относительно низкими. Агрессивность придонных вод Восточно-Сибирского и Берингова морей, например, является естественной. Некоторые придонные воды Баренцева моря также близки к коррозионному состоянию.

Северный Ледовитый океан является **уникальным районом** с точки зрения комбинации естественно низких и продолжающих интенсивно уменьшаться степеней насыщения вод арагонитом. Степень насыщения поверхностных и шельфовых арктических вод карбонатом кальция будет прогрессивно снижаться под воздействием антропогенной деятельности.

Ученые считают, что Северный Ледовитый океан станет первым океаном, где поверхностные воды станут полностью коррозионными – это, скорее всего, произойдет в течение ближайших нескольких десятилетий, во время жизни сегодняшних молодых поколений.

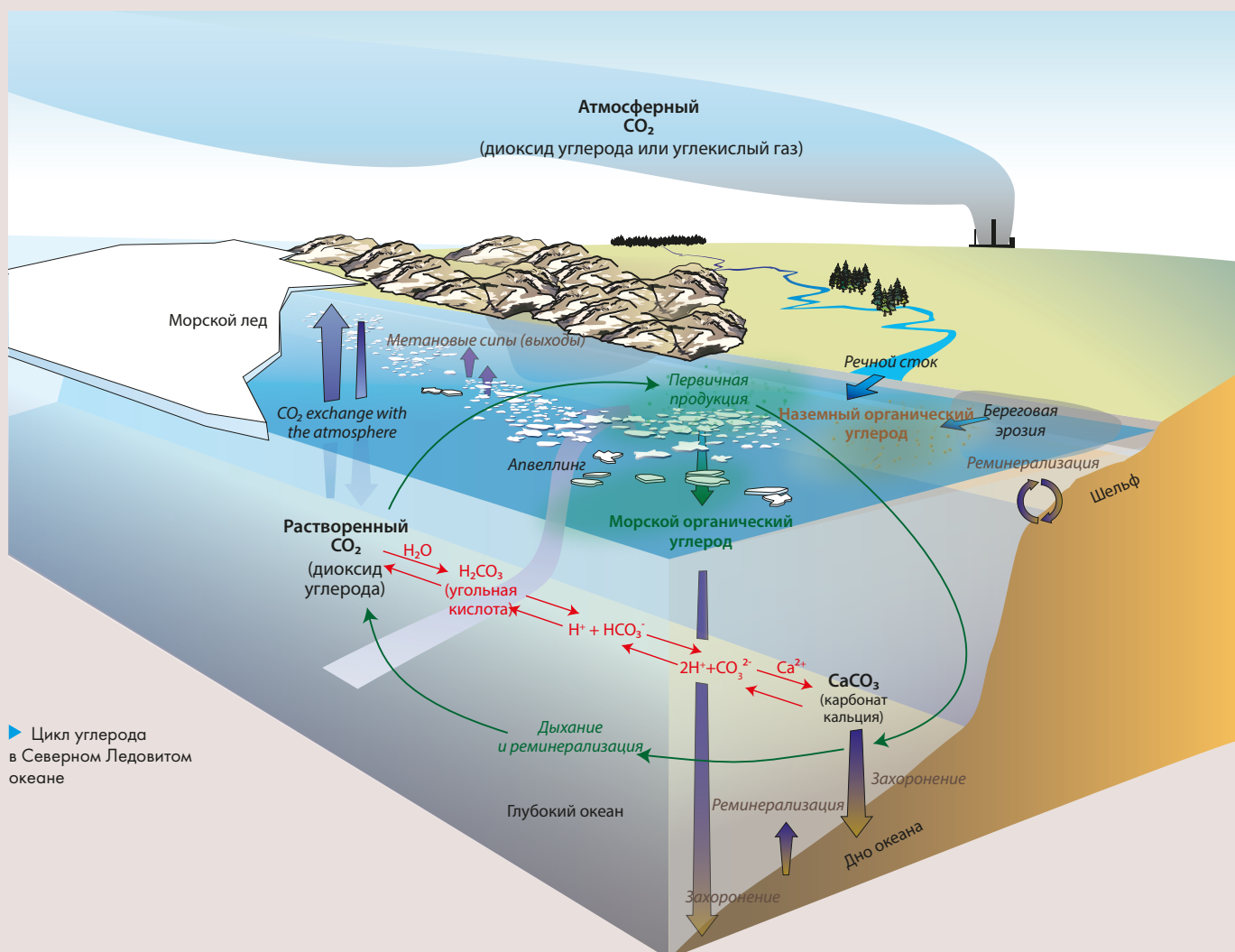
▲ Многие арктические организмы производят карбонат кальция для формирования своих раковин или скелетов

ПРИЧИНЫ ЗАКИСЛЕНИЯ ВОД СЛО

АНТРОПОГЕННЫЕ ВЫБРОСЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В АТМОСФЕРУ ЯВЛЯЮТСЯ ОСНОВНОЙ ДВИЖУЩЕЙ СИЛОЙ ЗАКИСЛЕНИЯ ОКЕАНА

Главной движущей силой закисления вод как Мирового, так и Северного Ледовитого океана является поглощение морской водой углекислого газа, выбрасываемого в атмосферу в результате антропогенной деятельности. Кислотность вод верхнего слоя океана увеличивается синхронно с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере (см. график на стр. 12).

Определенную роль в повышении кислотности играют и другие процессы, связанные с увеличением содержания диоксида углерода. Изменение климата также обостряет процессы закисления вод Северного Ледовитого океана и его последствия.



СВЯЗИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА: ОТ СУШИ К ВОЗДУХУ И МОРЮ

Количество **углекислого газа в атмосфере** с доиндустриальных времен увеличилось примерно на 40%. Наиболее резкие увеличения произошли в последние десятилетия.

Большинство современных выбросов диоксида углерода приходится на **сжигание ископаемого топлива** и производство цемента (90%). Изменения в землепользовании, такие как вырубка лесов, определяют значительно меньшую часть (10%).

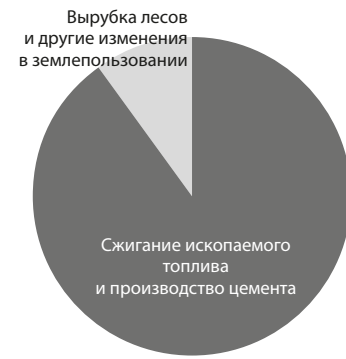
Океаны в настоящее время **поглощают** приблизительно одну четверть современных выбросов углекислого газа. В сущности, люди переносят углерод ископаемого топлива из-под земли (добыча угля, нефти и газа с последующим сжиганием) через атмосферу в океаны.

Удаляя парниковый углекислый газ из атмосферы, океаны помогают замедлить глобальное потепление, определяемое деятельностью человека. Этот ценный экологический сервис, однако же, имеющий последствия для морской химии и жизни.

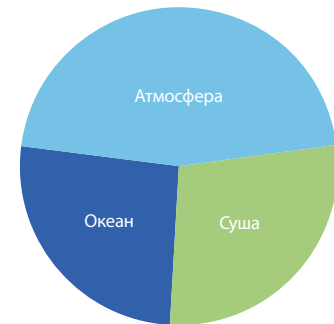
Влияние этого на химию морской воды оказалось существенным. Глобальная средняя **кислотность поверхностных вод океана повысилась** примерно на 30%¹ по сравнению с доиндустриальной эпохой, и **коррозионные по отношению к арагониту области морской воды продолжают расширяться**.

Влияние на морские организмы гораздо труднее подтвердить документально.

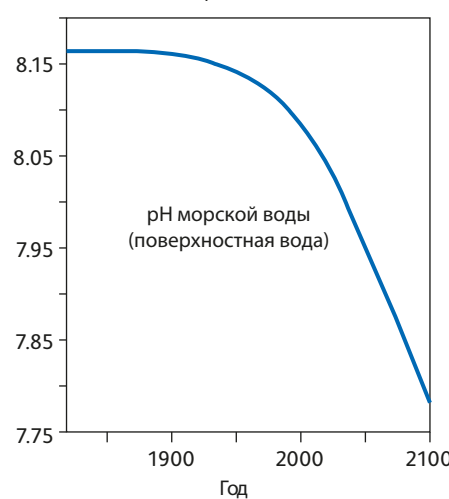
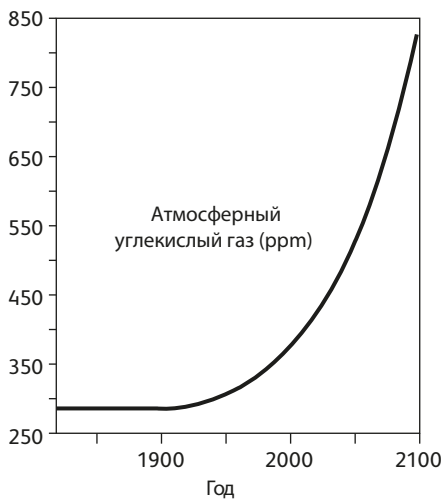
Выбросы углерода



Перераспределение углерода



▼ Модельные расчеты отклика океана на увеличение антропогенных выбросов углекислого газа



МНОГОЛИКИЙ УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ

Добавление углекислого газа в морскую воду имеет химические и биологические последствия:

- **Увеличивается концентрация углекислого газа.** Увеличение содержания углекислого газа в морской воде, как правило, меняет внутреннюю химию тела хладнокровных животных. Большинство морских животных хладнокровные; птицы и млекопитающие таковыми не являются. Морские водоросли используют углекислый газ для фотосинтеза.
- **Повышается кислотность.** Многие морские животные растут более медленно при уровне кислотности, прогнозируемом на ближайшие столетия. К ним, например, относятся моллюски, морские гребешки и ежи.
- **Концентрация растворенного бикарбонат-иона увеличивается.** Это увеличение незначительно. Некоторые морские водоросли используют этот ион для фотосинтеза.
- **Концентрация растворенного карбонат-иона уменьшается.** Низкое содержание этого иона способствует увеличению риска растворения арагонита и других форм карбоната кальция.

¹ Согласно докладу Рабочей группы I МГЭИК, величина pH поверхностных вод океана снизилась на 0,1 ед. pH с начала индустриальной эры, что соответствует увеличению концентрации ионов водорода на 26%.



Другие процессы, связанные с углекислым газом

Добавление углекислого газа в морскую воду, независимо от источника, напрямую увеличивает (\uparrow) кислотность морской воды. Удаление двуокиси углерода любым образом уменьшает (\downarrow) кислотность морской воды.

	Влияние на содержание CO_2 в морской воде	Влияние на кислотность морской воды	Влияние на степень насыщения морской воды арагонитом
Поглощение атмосферного CO_2 океаном	\uparrow	\uparrow	\downarrow
Фотосинтез	\downarrow	\downarrow	\uparrow
Разложение растительных или животных останков (реминерализация)	\uparrow	\uparrow	\downarrow
Дыхание	\uparrow	\uparrow	\downarrow
Взаимодействие метана с кислородом	\uparrow	\uparrow	\downarrow
Образование арагонита (и других форм карбоната кальция)	\uparrow	\uparrow	\downarrow
Растворение арагонита (и других форм карбоната кальция)	\downarrow	\downarrow	\uparrow

Фотосинтез удаляет углекислый газ из морской воды в освещенном верхнем слое океана. **Дыхание и разложение**, напротив, добавляют углекислый газ. Так как глубинные воды океана находятся за пределами досягаемости солнечных лучей (следовательно, там нет фотосинтеза, только дыхание и распад), они, естественно, обогащены двуокисью углерода и имеют высокую кислотность. В высоких широтах краткое, но интенсивное весенне-летнее цветение фитопланктона (\downarrow морской кислотности) в освещенных солнцем верхних слоях океана сопровождается последующим осенним импульсным распадом органического вещества (\uparrow кислотности) в более глубоких слоях.

Метан может вступать в реакцию с кислородом с образованием диоксида углерода. В некоторых арктических районах шельфа метан просачивается с морского дна в результате естественного затопления шельфа и потепления после последнего ледникового

периода. Поэтому эффект процесса окисления метана наиболее сильно проявляется в придонных водах шельфа.

Образование карбоната кальция повышает содержание углекислого газа в морской воде. В океане основная часть этого минерала образуется в верхнем освещенном слое воды. **Растворение карбоната кальция** снижает содержание углекислого газа в морской воде. В океане растворение происходит, главным образом, в более глубоких слоях, куда после отмирания погружаются останки морских организмов.

Биогенные элементы также могут косвенно влиять на кислотность морской воды. При благоприятных условиях (например, при достаточном освещении) такие биогенные элементы, как азот или фосфор, могут стимулировать фотосинтез в верхнем слое океана. Большая часть новообразованного органического вещества, в конечном итоге, опускается в нижние слои и разлагается.

Арктические реки (стр. 4) являются важным поставщиком биогенных элементов. Вблизи внешней кромки континентального шельфа источником биогенных элементов, а также диоксида углерода может быть периодический апвеллинг. Такой эпизодический восходящий поток морской воды может поставлять в фотический слой питательные вещества, инициируя, таким образом, новый цикл фотосинтеза/разложения.

Наземный органический углерод (биологический материал) может также косвенно влиять на кислотность морской воды. Арктические реки несут большое количество органического вещества на шельф, где морские микроорганизмы разлагают и превращают некоторую часть этого когда-то живого материала в диоксид углерода. Органический углерод поступает в море и в результате эрозии берегов; тающая подводная мерзлота является еще одним его дополнительным источником.

Географические последствия этих разнообразных процессов обсуждаются на стр. 12 и 13.

СВЯЗЬ С КЛИМАТИЧЕСКИМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ: ПОТЕПЛЕНИЕ, РАСПРЕСНЕНИЕ И ДРУГОЕ

Основные последствия **изменения климата**, влияющие на закисление вод Северного Ледовитого океана, включают в себя:

- Сокращение площади морского льда.
- Увеличение поступления пресной воды и органического углерода

Северный Ледовитый океан – это **единственное место** на Земле, где эти факторы взаимодействуют в таком грандиозном масштабе, интенсифицируя закисление вод, вызванное ростом содержания углекислого газа в атмосфере.

Арктический регион нагревается, и **лед превращается в воду**. Ледники и снега тают, оттаивает и вечная мерзлота. Речной сток увеличивается. Морской лед исчезает. Количество атмосферных осадков (снега и дождя) может возрасти.

Добавление пресной воды в океан:

- Повышает чувствительность океана к углекислому газу. Добавление диоксида углерода к распресненной морской воде вызывает большее увеличение кислотности, чем в случае его добавления к неразбавленной морской воде.
- Снижает степень насыщения вод арагонитом и другими формами карбоната кальция. Разбавление пресной водой, как правило, уменьшает концентрации как растворенного кальция, так и карбонат-иона в морской воде.
- Усиливает стратификацию океана. Устойчивая стратификация вод препятствует вертикальному перемешиванию и поступлению в верхние слои биогенных элементов; изолированный поверхностный слой, следовательно, более подвержен истощению питательных веществ.

Таяние морского льда

(в отличие от материкового) также:

- Увеличивает площадь морской поверхности, контактирующей с обогащенной углекислым газом атмосферой. Холодная, недавно вступившая в контакт с атмосферой морская вода, как правило, способна быстро поглощать большие количества углекислого газа.

- Поддерживает апвеллинг у кромки шельфа. Когда кромка льда отступает за внешнюю границу континентального шельфа, условия становятся более благоприятными для подъема кислых и богатых питательными веществами морских вод с глубин океана.

Эрозия берегов:

- Поставляет большое количество органического углерода в шельфовые воды. Морские микроорганизмы могут превратить это органическое вещество, которое когда-то хранилось в береговых почвах, лишайниках или растениях, в диоксид углерода.

Оттаивание вечной мерзлоты на суше и особенно на морском дне:

- Поступление больших количеств органического вещества в шельфовые воды. Микробы могут преобразовать это когда-то живое органическое вещество в диоксид углерода.

Потепление морской воды:

- Замедляет поступление углекислого газа в океан. Более теплая морская вода содержит меньше углекислого газа, чем холодная.
- Увеличивает степень насыщения вод карбонатом кальция. Этот эффект важен и в глобальном масштабе, и в Арктике, где в настоящее время пресные воды сильнее снижают степень насыщения вод карбонатом кальция.
- Может обусловить выделение метана из шельфовых отложений. Это усугубит закисление морской воды и уменьшит содержание в ней кислорода.

Изменение климата также влияет на **первичную продуктивность** морских вод (фотосинтез), но более сложным образом. Конечный результат пока является неясным и, вероятно, отличается от района к району.



© George Burba / Shutterstock.com



© Nightman1965 / Shutterstock.com



© Steven Kazlowski / Science Faction / Corbis

ИЗМЕНЧИВОСТЬ АРКТИКИ: ПОСТОЯННО МЕНЯЮЩАЯСЯ МОЗАИКА

ЗАКИСЛЕНИЕ ВОД В СЕВЕРНОМ ЛЕДОВИТОМ ОКЕАНЕ НЕОДНОРОДНО

Северный Ледовитый океан не ведет себя как единое целое. В разных регионах и в разное время доминируют различные процессы, определяющие закисление. Результатом является сложная, постоянно меняющаяся мозаика из различных по степени уязвимости к закислению вод.

ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ: ФЛУКТУАЦИИ ОТ ТРЕНДА

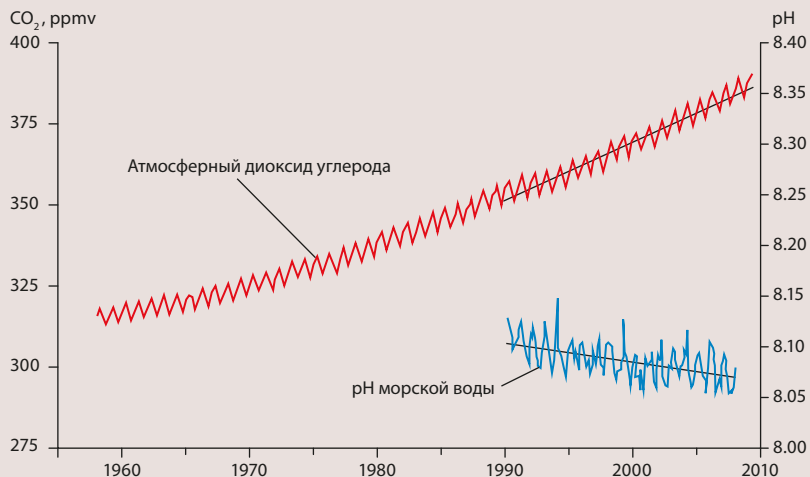
Временная изменчивость может быть краткосрочной и долгосрочной. Например, в мелководных прибрежных водах в дневное время кислотность может быть значительно ниже, чем в ночное время из-за определяемого освещением суточного цикла фотосинтеза и дыхания (см. таблицу на стр. 10).

Также могут происходить существенные сезонные изменения. Вспышка весеннего цветения фитопланктона, которая начинается с возвращением солнечных дней после долгой арктической зимы, может существенно снизить кислотность морской воды.

Такие суточные, сезонные и межгодовые колебания накладываются на устойчивый долгосрочный тренд постепенного увеличения концентраций углекислого газа в морской воде и морской кислотности (рН снижается). Такой же тип тренда можно увидеть и в длинных рядах данных для всего Мирового океана. Со временем диапазон природных взлетов и падений кислотности и степени насыщения вод карбонатом кальция, скорее всего, достигнет пределов, которые могут представлять опасность для жизнедеятельности некоторых морских организмов.

Временная изменчивость особенно велика на обширном арктическом шельфе. Глубокая часть океа-

▼ С увеличением содержания углекислого газа в атмосфере рН поверхностных вод океана уменьшается (увеличивается кислотность). Краткосрочные колебания накладываются на долгосрочные тенденции. Приведены данные северной части Тихого океана в районе Гавайских островов, США.



на, напротив, относительно стабильна. Это различие может быть важным для того, как разные организмы справляются с закислением океана. Прибрежные виды уже привыкли к большим колебаниям в условиях окружающей среды (например, температуры, солености и кислотности) и поэтому могут оказаться устойчивыми к воздействию закисления океана.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ: ПЕСТРАЯ АРКТИКА

Окружающие моря

Воды **Северных морей** подвергаются быстрому закислению. Эти воды эффективно поглощают углекислый газ из атмосферы благодаря их низкой температуре и интенсивному фотосинтезу. Кроме того, их химический состав отличается повышенной чувствительностью к углекислому газу. Глубокое вертикальное перемешивание переносит богатые углеродом воды с поверхности океана в нижние слои. В Исландском и Норвежском морях кислотность поверхностных вод заметно выросла в последние годы (стр. 6). В Исландском море значительные площади придонных вод также переходят к агрессивным условиям. Ограниченные данные о состоянии поверхностных вод Гренландского моря не позволяют выявить какую-либо очевидную тенденцию.



В Баренцевом море,

по-видимому, происходит значительное поглощение атмосферного углекислого газа. Тем не менее, антропогенный сигнал здесь может быть сильным за счет поступления морской воды из других районов океана. Некоторые придонные воды уже близки к коррозионным условиям. В связи с продолжающимися выбросами углекислого газа в атмосферу и возможным локальным усилением фотосинтеза и разложения органического вещества, некоторые зоны этой биологически и экономически важной области могут стать коррозионными по отношению к арагониту в ближайшем будущем.



Берингово море, один из наиболее биопродуктивных в мире районов, является важным источником коррозионных вод в Северном Ледовитом океане. Холодные, старые воды Тихого океана, обогащенные углекислым газом, поступают в океан через Берингов пролив. В Беринговом море воды с высоким содержанием диоксида углерода часто поднимаются из глубин к поверхности океана. Интенсивный весенне-летний фотосинтез изымает углекислый газ, таким образом, смягчая закисление поверхностных вод. Потребление и разложение опускающихся биологических останков, напротив, усиливает закисление глубинных вод. Неоднородный по пространству и эпизодический отбор проб и большие естественные сезонные перепады в химических свойствах вод делают сложной количественную оценку тенденции закисления в этой области.



Шельфовые моря

Благодаря поступлению органического углерода с речным стоком и в результате береговой эрозии, значения кислотности поверхностных вод, как правило, больше в прибрежной зоне, чем в глубоком бассейне Северного Ледовитого океана.



Tor Ivan Karlsen

На **Сибирский шельф** океанические воды поступают из Атлантики и Тихого океана, в то время как реки приносят пресную воду. Реки, береговая эрозия и таяние вечной подводной мерзлоты обеспечивают обильные поставки органического вещества на шельф. В поверхностных водах интенсивный фотосинтез изымает углекислый газ, в то время как избыток пресной воды усиливает воздействие закисления. Кроме того, большое количество метана просачивается из донных осадков. Придонные воды Сибирского шельфа являются чрезвычайно агрессивными по отношению к арагониту.



Шельф западной Арктики (моря Чукотское и Бофорта)

находится под сильным влиянием вод, поступающих из северной части Тихого океана, которым присуща природная высокая кислотность. Летнее цветение фитопланктона сезонно снижает кислотность поверхностных вод, в то время как оседание и распад биологических останков служит причиной увеличения кислотности придонных вод. Этот район характеризуется относительно высокой кислотностью вод даже без антропогенного влияния.



Канадский Арктический архипелаг

служит транспортной артерией для вод, вытекающих из моря Бофорта в сторону моря Лабрадор. В процессе переноса естественно высокая кислотность этих вод дополнительно увеличивается из-за поступления пресных вод и переработки и распада органического вещества. Ученые обнаружили, что поверхностные и подповерхностные воды в заливах Коронации и Гудзоновом в настоящее время являются коррозионными по отношению к арагониту.



Центральный бассейн СЛО

Источником холодных поверхностных вод центральной части Северного Ледовитого океана являются, в значительной степени, окружающие шельфовые моря. Эти воды имеют высокую от природы кислотность, которая возрастает далее при поглощении антропогенного углекислого газа. Канадский бассейн стал одной из первых глубоководных областей, где ученые нашли коррозионные воды на поверхности океана. Глубинные воды Арктического бассейна характеризуются естественным высоким содержанием диоксида углерода и воды ниже ~ 2500 м также являются коррозионными. Центральная часть Северного Ледовитого океана была в значительной степени изолирована от естественного и антропогенного закисления океана, но эта область, вероятно, будет подвержена более сильному воздействию в будущем.



ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

КИСЛОТНОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД СЛО БУДЕТ ПРОДОЛЖАТЬ УВЕЛИЧИВАТЬСЯ

Наблюдения последних двух десятилетий показывают, что **кислотность поверхностных вод всего Северного Ледовитого океана будет продолжать расти**, пока увеличивается концентрация углекислого газа в атмосфере.

Эта общая тенденция будет видоизменяться в зависимости от многих факторов, в том числе, от циркуляции океана и процессов образования/таяния морского льда. Некоторые из этих процессов усиливают эффект закисления океана, в то время как другие уменьшают его последствия.

Все эти процессы подвержены большой естественной изменчивости. Многие из них меняются также в ответ на антропогенные воздействия и изменения климата.

В результате этих сложных взаимосвязей, точные временные и пространственные параметры будущего закисления Северного Ледовитого океана трудно прогнозировать. Ученые, однако, уверены в перспективе глобального роста кислотности вод в случае дальнейшего увеличения содержания углекислого газа в атмосфере.

Результаты моделирования **будущих условий** показывают, что среди всех областей Мирового океана, поверхностные воды Северного Ледовитого океана будут испытывать:

- **Наибольший** рост кислотности.
- **Самое раннее** широкое распространение коррозионных по отношению к арагониту условий.

Эти прогнозы являются общепризнанными.

Значительная неопределенность касается выделения метана из донных отложений. Если продолжающееся потепление ускорит этот процесс, то преобразование больших объемов метана в диоксид углерода может вызвать резкое увеличение кислотности морской воды.

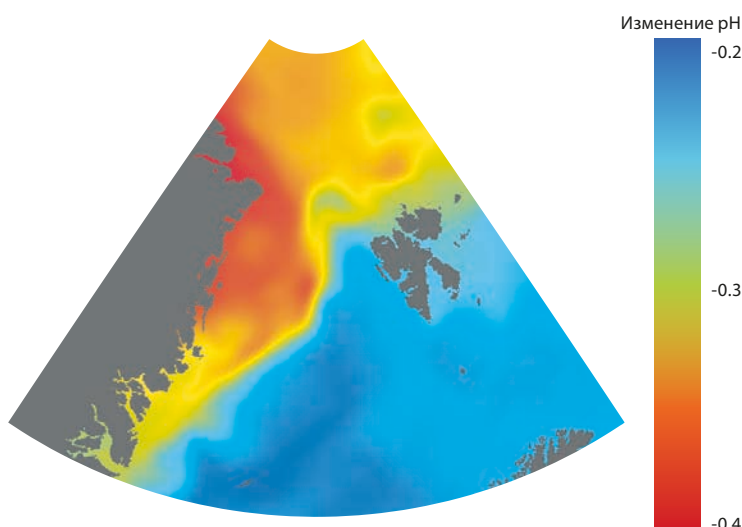
Другая неопределенность связана с тем, как повлияют на закисление будущие изменения в первичной продукции вод.

Что всё это значит для **морской жизни в Арктике**? Последствия (стр. 16–21) в настоящее время являются неопределенными, но существующие данные позволяют предположить, что:

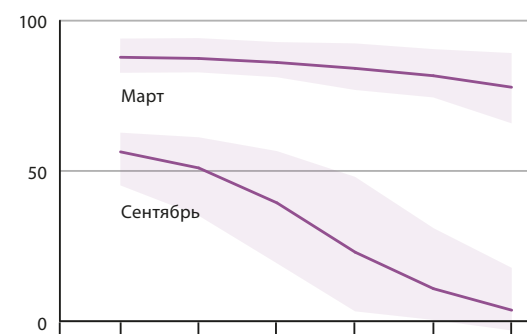
- Закисление океана повлияет на морскую жизнь в Арктике.
- Вполне вероятно, что некоторые арктические морские организмы положительно отреагируют на новые условия, а другие окажутся в невыгодном положении, возможно, вплоть до локального исчезновения.
- Арктические морские экосистемы уязвимы к закислению океана.

▶▶ Модельный прогноз состояния поверхностных вод Северного Ледовитого океана.

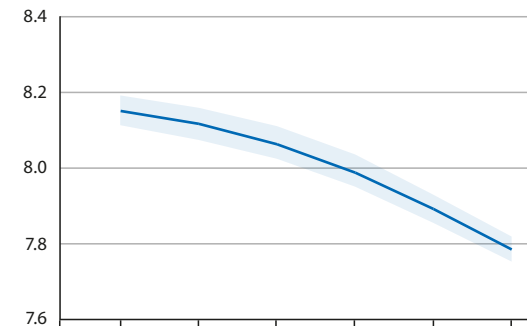
▼ Модельные оценки снижения pH поверхностных вод на границе Атлантического и Северного Ледовитого океанов



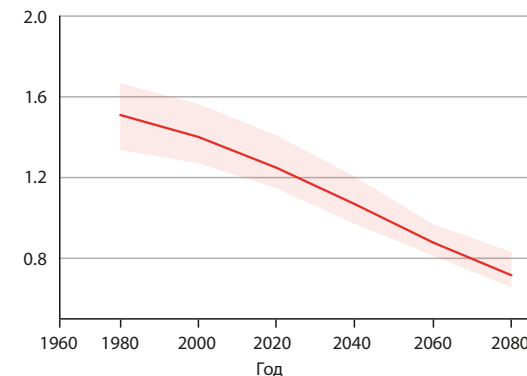
Площадь морского льда, %

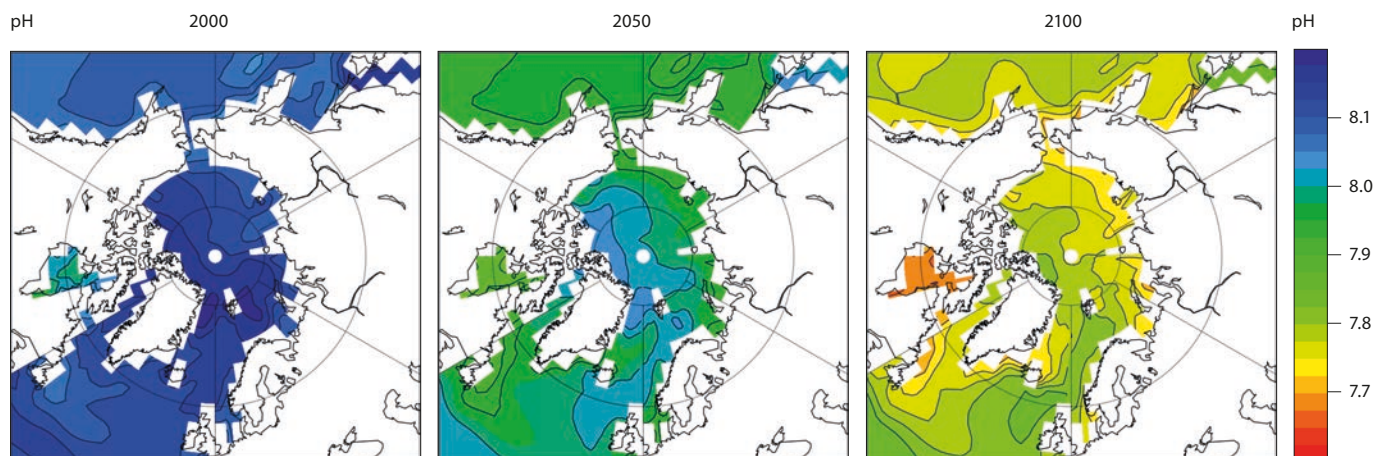


pH

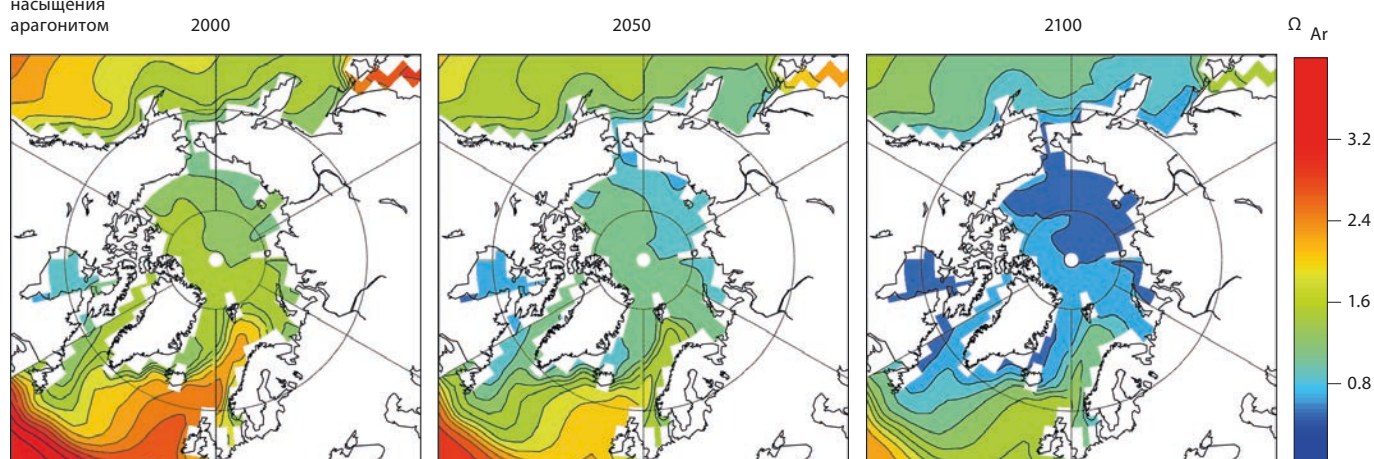


Степень насыщения арагонитом





Степень насыщения арагонитом



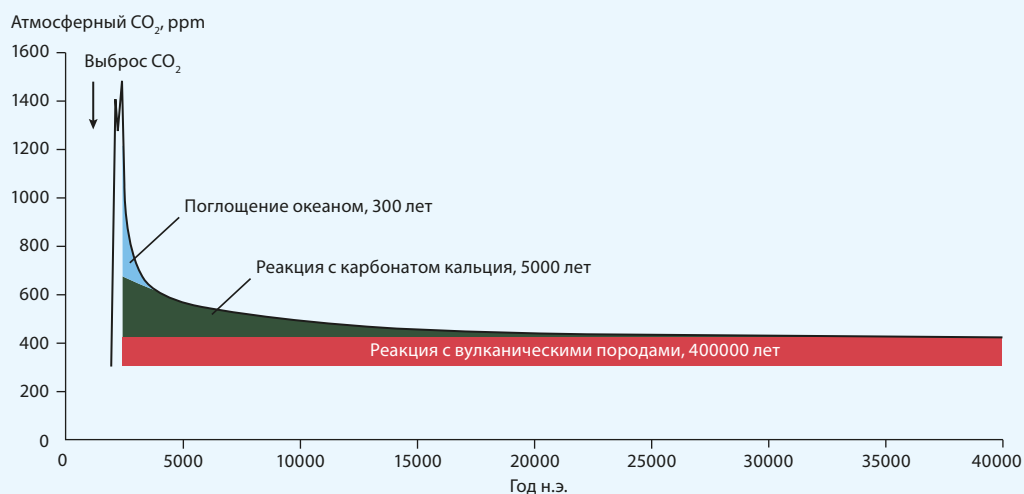
ВЗГЛЯД В ДАЛЕКОЕ БУДУЩЕЕ

Последствия сегодняшнего закисления океана будут **долговременными**. Так как содержание углекислого газа в атмосфере продолжает расти, кислотность поверхностных вод океана тоже будет увеличиваться. Когда концентрация двуокиси углерода в атмосфере стабилизируется и начнет уменьшаться, аналогично изменится и кислотность поверхностных вод океана.

Со временем, «лишняя» кислотность, накопленная в верхних слоях океана, будет проникать вниз в более глубокие воды. В конце концов, какая-то часть этой

кислотности нейтрализуется благодаря растворению карбоната кальция на морском дне и выветриванию вулканических пород. Эти нейтрализующие процессы займут очень долгое время (тысячи лет).

Углекислый газ, поступивший в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива, останется в системе океан–атмосфера на десятки тысяч лет. И даже по истечении этого времени химия океана не вернется к своему доиндустриальному состоянию.



▲ Модельные прогнозы величин рН и степени насыщения арагонитом поверхностных вод Северного Ледовитого океана в XXI веке.

◀ Модельные расчеты изменения содержания атмосферного диоксида углерода после импульсного выброса в результате сжигания ископаемого топлива.



КАЛЬЦИФИЦИРУЮЩИЕ ОРГАНИЗМЫ В АРКТИКЕ

Многие ученые сосредоточили свои исследования на **кальцифицирующих организмах** – тех растениях и животных, которые строят раковины, скелеты, или другие твердые части тела из карбоната кальция. Одной из причин этого является то, что закисление океана может влиять на биологический процесс создания этого минерала. К кальцифицирующим арктическим организмам относятся крылоногие (на фото), кораллы, моллюски, устрицы и некоторые морские водоросли.



ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОЙ МОРСКОЙ ЖИЗНИ

ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА БУДЕТ ИМЕТЬ ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ МОРСКОЙ ЖИЗНИ В АРКТИКЕ

Данных о воздействии закисления океана на арктические растения и на животных недостаточно. Поэтому оценка потенциальных воздействий в Арктике базируется, в основном, на исследованиях неарктических растений и животных, интерпретируемых с учетом особенностей арктических организмов и экосистем. Остаются большие неопределенности, но можно сделать некоторые выводы.

ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

Закисление океана обладает потенциалом для влияния на широкий спектр морской жизни. Ученые изучают две общие категории воздействий – *прямые и косвенные эффекты*.

Прямые эффекты заключаются в изменениях в физиологии или поведении. Примеры включают в себя изменения в сенсорном восприятии (например, обоняние), темпах роста, жизнеспособности на разных этапах жизни, функционировании иммунной системы, строительстве оболочки (например, скорости кальцификации или прочности оболочки), фотосинтезе, дыхании, обмене веществ и репродуктивности. Прямые эффекты могут быть полезными или пагубными.

Косвенные эффекты более трудно наблюдать и предсказывать. Растения и животные, не подвергшиеся непосредственному воздействию, могут ощущать последствия закисления океана посредством изменений в запасах питания или других связей в экосистеме – например, изменение давления, оказываемого хищниками или конкурентами.

Рассмотрим ситуацию с моржами, которые в значительной степени питаются моллюсками и ракообразными. Так как эта часть добычи может быть непосредственно затронута процессом закисления вод, моржи, в свою очередь, могут ощутить значительные изменения в доступности или качестве некоторых из своих предпочитаемых продуктов.

Другой пример: ограниченные данные показывают, что некоторые кальцифицирующие макроскопические морские водоросли могут расти медленнее в условиях будущего закисления океана (прямое неблагоприятное воздействие). Поэтому их некальцифицирующие соперники могут извлечь выгоду из снижения конкуренции в пространстве и в других ограниченных ресурсах (косвенные выгоды).

Исследования, проведенные в других частях Мирового океана, показывают, что эти косвенные эффекты могут быть крайне важны. Косвенные эффекты, возможно, наиболее вероятный способ, которым будут затронуты арктические морские виды.

ПОБЕДИТЕЛИ И ПРОИГРАВШИЕ

Растения и животные демонстрируют широкий спектр реакций на закисление океана. На сегодняшний день исследованиями выявлены несколько общих закономерностей:

- **Кальцификаторы** – широкий спектр кальцификаторов производит раковины или скелеты более медленно при уровнях кислотности, прогнозируемых на ближайшие столетия. Некоторые кальцификаторы реагируют нейтрально или даже положительно на повышенное содержание углекислого газа.
- **Ранние и переходные этапы жизни** – на ранних этапах жизненного цикла (особенно на этапе личиночных форм) организмы, как правило, более восприимчивы к воздействию закисления, чем более поздних стадиях. Переходные этапы жизни (например, личинка) – также время повышенной чувствительности.
- **Прикрепленные организмы** – растения и животные, которые живут прикрепленными к морскому дну, как правило, более восприимчивы к воздействию закисления океана, чем плавучие и плавающие виды. Некоторые прикрепленные организмы могут исчезнуть из регионов, которые они ранее занимали.
- **Медленнорастущие организмы** – арктические виды, как правило, растут медленно, потому что они живут в холодных водах. Более длительные сроки развития могут обеспечить меньше возможностей для адаптации к быстро меняющимся условиям.
- **Фотосинтезаторы** – увеличение диоксида углерода может быть выгодно некоторым растениям и водорослям, которые используют углекислый газ для фотосинтеза. Морской траве, некальцифицирующим морским водорослям и некоторым видам фитопланктона это пойдет на пользу непосредственно. Некоторые некальцифицирующие организмы могут извлечь выгоду косвенно в том случае, если их кальцифицирующие конкуренты будут страдать от неблагоприятных воздействий.



Steve Gschmeissner/
Science Photo Library



International Research Institute
of Stavanger



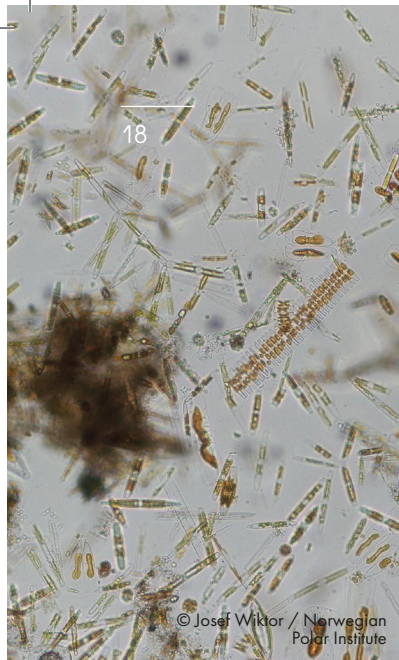
Fredrik Pleijel



F. Welter Schultes, AnimalBase



Michel Braunstein



© Josef Wiktor / Norwegian Polar Institute



Sam Dupont



Fredrik Pleijel



Sam Dupont

ПЕРЕКЛИЧКА: ОБЗОР АРКТИЧЕСКОЙ МОРСКОЙ ЖИЗНИ

Вирусы в изобилии находятся в морской воде и особенно в морском льду. Вирусные реакции на повышение концентрации диоксида углерода слабо изучены, а результаты исследований весьма разнообразны. Ни одно из исследований определенно не показало прямое влияние закисления океана на морские вирусы. Поскольку жизненные циклы вирусов привязаны к жизни их хозяев, вирусные процессы могут быть связаны с закислением косвенно.



Бактерии важны не только в морской воде, но и в морском льду. Исследователи единодушны в том, что морские бактериальные сообщества не будут напрямую зависеть от увеличения кислотности, прогнозируемого на конец этого века. Результаты некоторых исследований показывают, что бактериальные сообщества реагируют на закисление косвенно, через взаимодействие с непосредственно затронутым фитопланктоном. Закисление океана может влиять и на некоторые пищевые цепи, в которых участвуют микробы.



Фитопланктон является доминирующим фотосинтезаторм в арктических морских экосистемах. Он не показывает последовательного повсеместного отклика на закисление океана. Большинство кальцифицирующих форм демонстрирует уменьшение кальцификации, но некоторые недавние исследования позволяют сделать вывод о том, что часть морского фитопланктона является устойчивой к воздействию закисления.



Фораминиферы включают в себя как кальцифицирующие, так и некальцифицирующие виды. Ограниченные данные показывают, что мягкое закисление океана будет оказывать небольшое действие или даже вовсе не будет влиять на выживание фораминифер, но может повлиять на темпы их роста. Увеличение содержания двуоксида углерода обычно приводит к созданию менее массивных оболочек. Более экстремальные уровни закисления, скорее всего, уменьшат выживание и разнообразие кальцифицирующих видов. Последствия доминирования некальцифицирующих видов для экосистемы пока не ясны.



Макроскопические морские водоросли существуют и в кальцифицирующей, и в некальцифицирующей формах. Кальцифицирующие макроводоросли могут быть особенно уязвимы к будущему закислению океана, потому что многие полярные виды слабо кальцифицированы и их рост может быть нарушен. Большинство некальцифицирующих организмов, вероятно, получают прямую выгоду (больше углекислого газа для фотосинтеза), а также косвенную (снижение конкуренции со стороны кальцифицирующих видов).

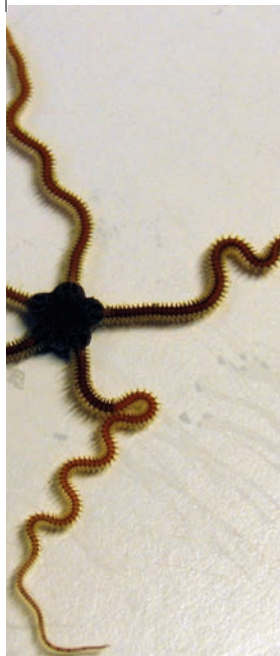


Кораллы строят из арагонита рифы и сады, которые являются важной средой обитания для многих организмов, в том числе коммерчески важных рыб. Закисление океана может иметь ограниченное влияние на самые известные кораллы холодной воды (*Lophelia*), особенно, если они хорошо обеспечены питанием. Воздействие на ранних этапах жизни и на другие холодноводные виды неизвестно. Более старые скелеты *Lophelia* и мертвые рифы, вероятно, растворяются в агрессивных по отношению к арагониту водах. Экологические последствия этой потенциальной потери для обитателей морского дна неизвестны.



Моллюски являются весьма разнообразной коллекцией животных, охватывающей двустворчатых моллюсков (в том числе устриц и мидий), брюхоногих моллюсков (улиток) и головоногих моллюсков (включая кальмаров и каракатиц). Эта группа, включающая в себя множество кальцифицирующих видов, демонстрирует широкий спектр биологических откликов на закисление океана. Двустворчатые моллюски, птероподы («морские бабочки»; подгруппа брюхоногих моллюсков) и головоногие моллюски являются важными компонентами арктических пищевых цепей. Воздействие на эти виды может иметь волновой эффект для арктических экосистем. Кальцифицирующие моллюски, вероятно, будут негативно воспринимать закисление океана — особенно плавучие виды с тонкой карбонатной оболочкой, такие, как некоторые птероподы, а также особо чувствительные на ранних стадиях жизненного цикла. Воздействие на экологически важные некальцифицирующие или слабо кальцифицирующие виды (например, кальмары) неизвестно.





Shutterstock

Peter Prokosch

Иглокожие – это морские ежи, морские звезды и офиуры. Эта группа морских организмов относительно хорошо изучена, потому что она включает в себя экологически важные кальцификаторы. Большинство иглокожих образуют карбонат кальция, находясь как в виде личинок, так и во взрослом состоянии; некоторые используют относительно нестабильную форму карбоната кальция. Результаты некоторых исследований полярных иглокожих свидетельствуют о нейтральных откликах на закисление океана, но, в основном, реакции были отрицательными. Изменения в количестве иглокожих, по-видимому, будут иметь широкие последствия для арктических придонных экосистем.



К ракообразным относятся рачки (копеподы), крабы, омары и моллюски. Большинство это активно кальцифицирующие организмы, и многие из них играют ключевую роль в арктических экосистемах. Веслоногие, например, являются преобладающими травоядными, а также основным источником пищи для более крупных животных, в том числе, саяк. Ракообразные, в целом, как правило, относительно устойчивы к закислению океана, но тестирование полярных видов показало значительное снижение физиологических функций, особенно в личиночной стадии. Такие нарушения могут привести к снижению выживаемости. При этом ни одно из проведенных исследований не дает информации о влиянии закисления океана на рачков при уровнях концентраций углекислого газа, прогнозируемых на ближайшие два века.



Другие беспозвоночные изучены мало. Вне групп, упомянутых выше, информация доступна только для одного полярного вида – ленточного червя, обитающего в Антарктике. Исследования показали, что ожидаемый в ближайшем будущем уровень закисления не окажет существенного влияния на благополучие этого вида в изученные фазы жизни.



Рыбы имеют огромное значение для экосистемы, экономики и культуры Арктики. Степень воздействия закисления океана на арктических рыб неизвестна. Исследования атлантической трески



и минтая из более южных популяций показывают их устойчивость, но популяции, приспособленные к условиям Арктики, могут быть более чувствительны к закислению вод. Личинки рыб, по прогнозам, будут более уязвимы, чем взрослые, но до тех пор, пока не будут выполнены исследования различных поколений, делать определенные выводы было бы преждевременно. С точки зрения косвенных эффектов, особое беспокойство вызывает полярная треска, потому что она является опорой для арктических морских экосистем и на всех этапах жизни в значительной степени зависит от рачков. Тем не менее, исследования копепод показывают, что закисление вод вряд ли уменьшит доступность этой предпочитаемой треской добычи.

Морские птицы и млекопитающие

кормятся на льду, в воде и на морском дне. Закисление океана, по-видимому, не повлияет на этих животных непосредственно. Испытываемое ими воздействие будет опосредованным, через связи пищевой цепи. Морским птицам и млекопитающим, которые питаются кальцифицирующими видами, такими, как двустворчатые моллюски или птероподы, возможно, придется переключиться на другие источники питания, если из-за закисления эта добыча исчезнет или уменьшится ее количество.



Промысловое рыболовство обсуждается на стр. 22–24.

НОВЫЕ ЗАДАЧИ: КАК СПРАВИТЬСЯ С ЗАКИСЛЕНИЕМ ОКЕАНА

Исследователи только начинают изучать эти важные аспекты биологических откликов на закисление океана:

- Акклиматизация – насколько хорошо отдельные растения или животные приспособляются к жизни в более кислом океане?
- Адаптация – насколько легко могут эволюционировать виды в течение поколений, чтобы произвести потомство, способное выжить и процветать в водах с повышенной кислотностью?
- Синхронные изменения в окружающей среде – как хорошо разные организмы могут справиться с реальными комбинациями экологических изменений – например, не только с повышенной кислотностью, но и с более высокими температурами, менее солеными водами и сдвигом в пищевых цепях?

ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ АРКТИКИ

ВЛИЯНИЕ ЗАКИСЛЕНИЯ ОКЕАНА ДОЛЖНО ОЦЕНИВАТЬСЯ В КОНТЕКСТЕ ДРУГИХ ИЗМЕНЕНИЙ, ПРОИСХОДЯЩИХ В АРКТИЧЕСКИХ ВОДАХ

Арктические морские экосистемы восприимчивы к закислению океана, но его точные последствия неизвестны. Последние исследования позволили оценить вероятность уязвимости Арктики к закислению и определить степень сложности арктических экосистем.

Арктические пищевые цепи относительно просты и поэтому восприимчивы к разрушению. Как отмечается на стр. 4, арктические морские экосистемы характеризуются небольшим числом ключевых видов на каждом трофическом уровне. Фитопланктон является доминирующим фотосинтезаторм, базой пищевой цепи. Большие рачки являются преобладающими травоядными. Птероподы, криль и маленькие рыбы также служат для связи нижних трофических уровней с более высокими, населенными, в основном, морскими птицами и млекопитающими. Люди являются хищниками, вершиной пищевой цепи.

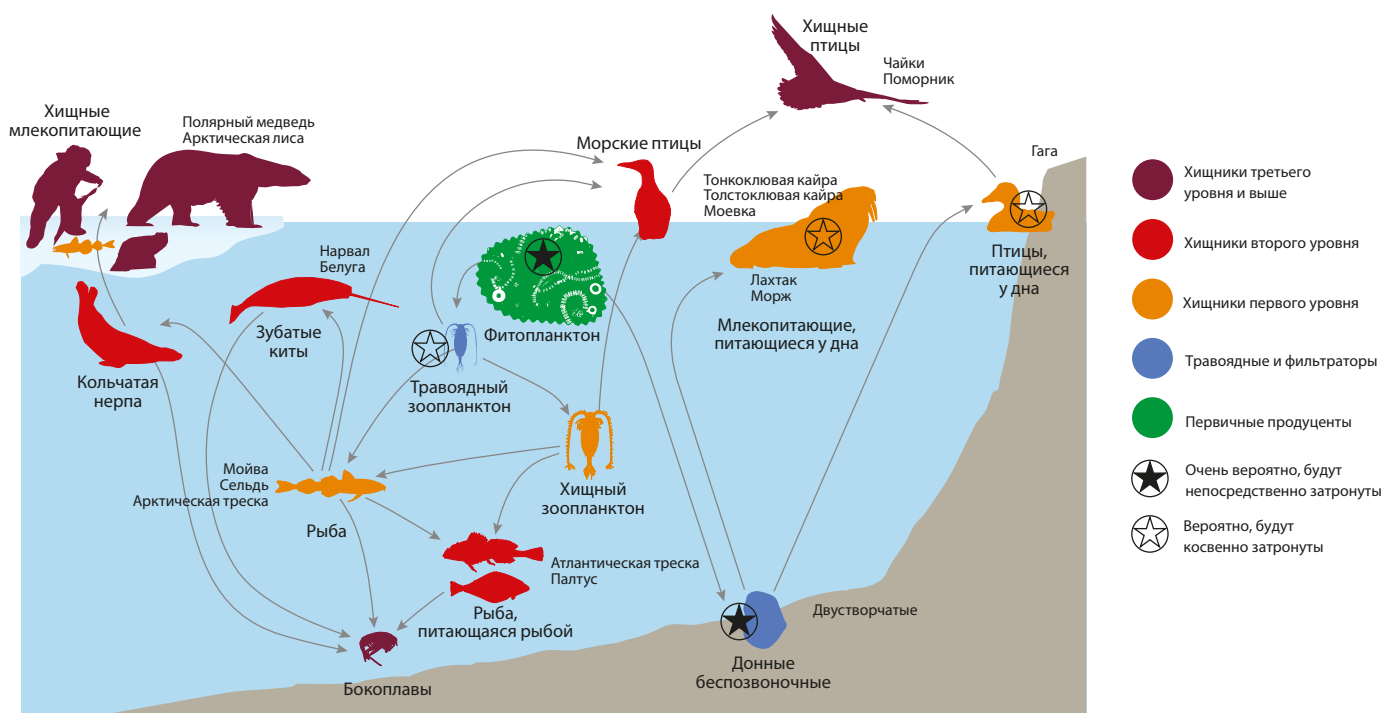
Эта относительно простая структура ограничивает варианты приспособления пищевых цепей к изменениям в окружающей среде. Если ключевой вид пищи вымирает или покидает область, пока не заселятся новые пищевые виды, у хищников существует мало альтернатив. Хищникам и другим потребителям придется перейти к новым источникам питания или поменять место обитания.

Закисление Северного Ледовитого океана происходит одновременно с другими крупномасштабными и быстрыми изменениями окружающей среды. Ученые еще не оценили совокупное воздействие потепления Северного Ледовитого океана, распреснения и закисления. Все эти изменения происходят сейчас.

Основной движущей силой изменений является потепление в Арктике. В последние несколько десятилетий летние температуры были выше, чем в любой другой период в последние две тысячи лет. В летнее время океан, вероятно, станет почти свободным ото льда в течение ближайших 30–40 лет.

Для океана такое потепление определяет каскад изменений. Например, отступление морского льда означает не только потерю среды обитания. В результате этого больше поверхности океана экспонируется для контакта с обогащенной углекислым газом атмосферой. Таяние ледового покрова и ледников добавляет пресную воду в море. Таяние вечной мерзлоты освобождает захороненный в ней древний органический углерод. Все эти изменения, как правило, ускоряют закисление океана или интенсифицируют его воздействие.

Происходят и другие изменения. Некоторые глобальные загрязнители, такие как ртуть, накапливаются в районах Крайнего Севера. Люди с трудом добывают местных животных, некоторые из которых находятся на грани исчезновения. Развиваются новые виды и отрасли промышленности. Арктические экосистемы вынуждены справляться со всеми этими изменениями одновременно.



Пока, однако, большинство научных исследований рассматривали лишь обособленные реакции каждого из видов на закисление. Эти исследования являются важной отправной точкой и остается еще много неразрешенных вопросов.

Воздействия на экосистемы гораздо сложнее. Множественные стрессы могут воздействовать сообща, усиливая влияние на окружающую среду. Или один тип стресса может нейтрализовать воздействие другого. Иногда разные стрессы не взаимодействуют вообще.

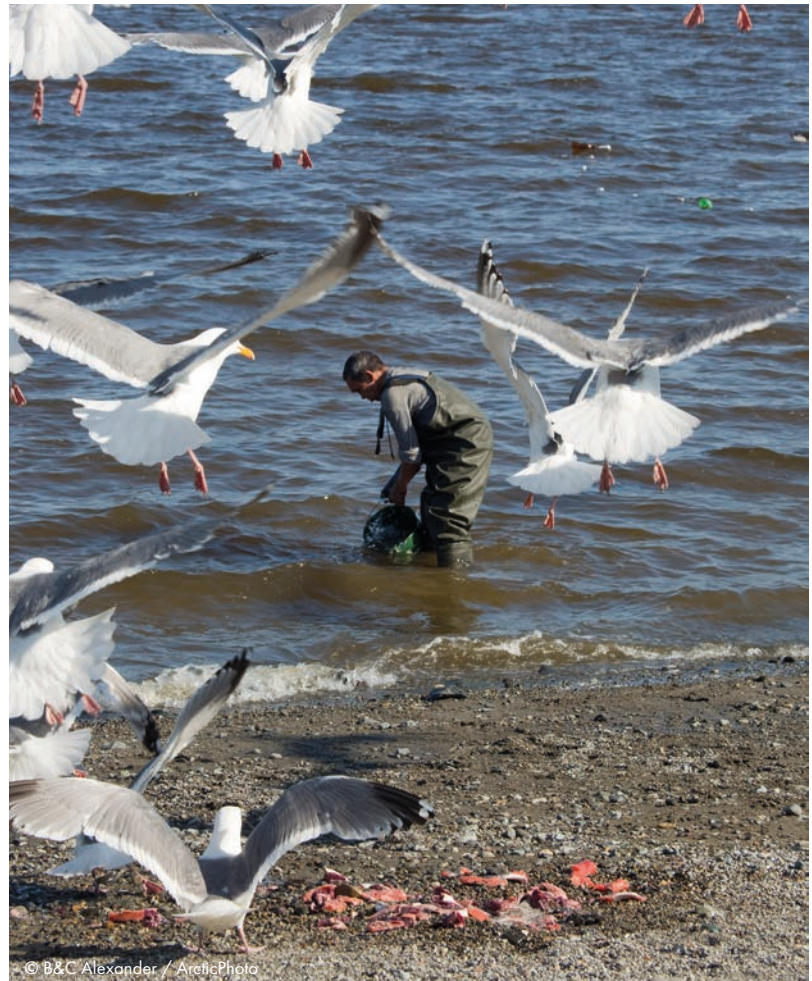
Морские организмы переживают не только изменения физических условий жизни, но и столкновения друг с другом. Например, два вида холодноводных рыб могут покинуть потеплевшую зону океана, но один из них может продвинуться дальше, встречая новых хищников или новую пищу. Два вида моллюсков могут расти более быстрыми темпами при более высоких температурах, но один из них сможет расти быстрее и получить конкурентное преимущество. Два конкурирующих иглокожих могут реагировать противоположно на закисление – один будет процветать, а другой – слабеть. Результатом всех этих различий является постоянно меняющаяся сеть сложных взаимодействий между всеми сосуществующими видами, от хищников до паразитов.

Взаимодействие сложных реакций растений и животных на меняющиеся условия окружающей среды и друг на друга может привести к неожиданным, непредсказуемым результатам. Рассмотрим случай береговых крабов, которые питаются улитками. Закисление океана ослабляет когти крабов, тем самым делая их менее эффективными хищниками. Однако закисление океана также истончает и защитные оболочки улиток. Кто победит? В проведенном исследовании – ни один. Эксперименты по закислению океана не показали общего изменения в потреблении крабами улиток.

В ряде исследований изучалось комбинированное воздействие биологических и небиологических факторов в ответ на закисление океана. Для арктических пищевых цепей такие данные недоступны.



© Jan Vermeer / Foto Natura / Minden Pictures / Corbis



© B&C Alexander / ArcticPhoto

ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКОГО МОРСКОГО РЫБОЛОВСТВА

ЗАКИСЛЕНИЕ ОКЕАНА МОЖЕТ ПОВЛИЯТЬ НА МОРСКОЙ РЫБНЫЙ ПРОМЫСЕЛ И ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЕ СЕВЕРНЫХ НАРОДОВ

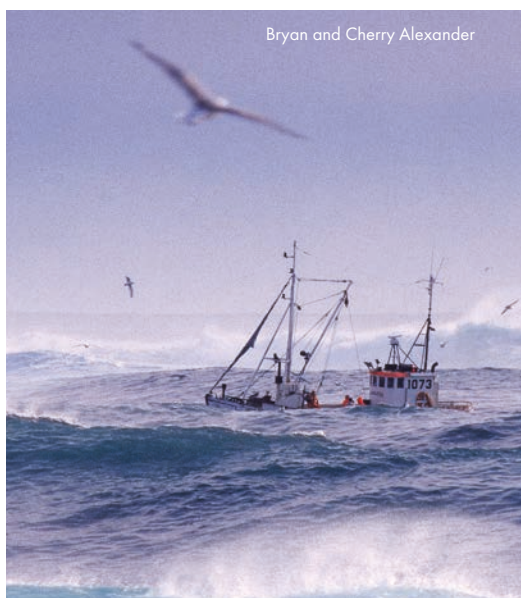
Арктические воды не только обеспечивают ценными видами рыб и моллюсков множество рыбаков, но и предлагают разные виды отдыха для местных жителей и туристов. В 2002 г. на приполярное рыболовство приходилось более 10% мирового вылова диких рыб и свыше 5% вылова ракообразных. Любительским рыболовством занимаются, в основном, местные жители, но туризм, включая экотуризм, является одной из самых динамично развивающихся отраслей в Арктике. Коренные народы, по-прежнему, полагаются, в основном, на местные продукты.

Закисление океана может повлиять на арктическое рыболовство за счет изменения численности, продуктивности и распределения арктических морских видов и, следовательно, изменения затрат на вылов, цены на рыбу и выгоды от рыболовства. Величина и направление изменений остаются неопределенными. Рост температуры и уменьшение площади морского льда также будут иметь важное и, вероятно, доминирующее значение.

Сделать более определенные заключения не представляется возможным из-за недостатка экономических исследований последствий закисления океана, особенно для Арктики. Необходимы дополнительные данные.



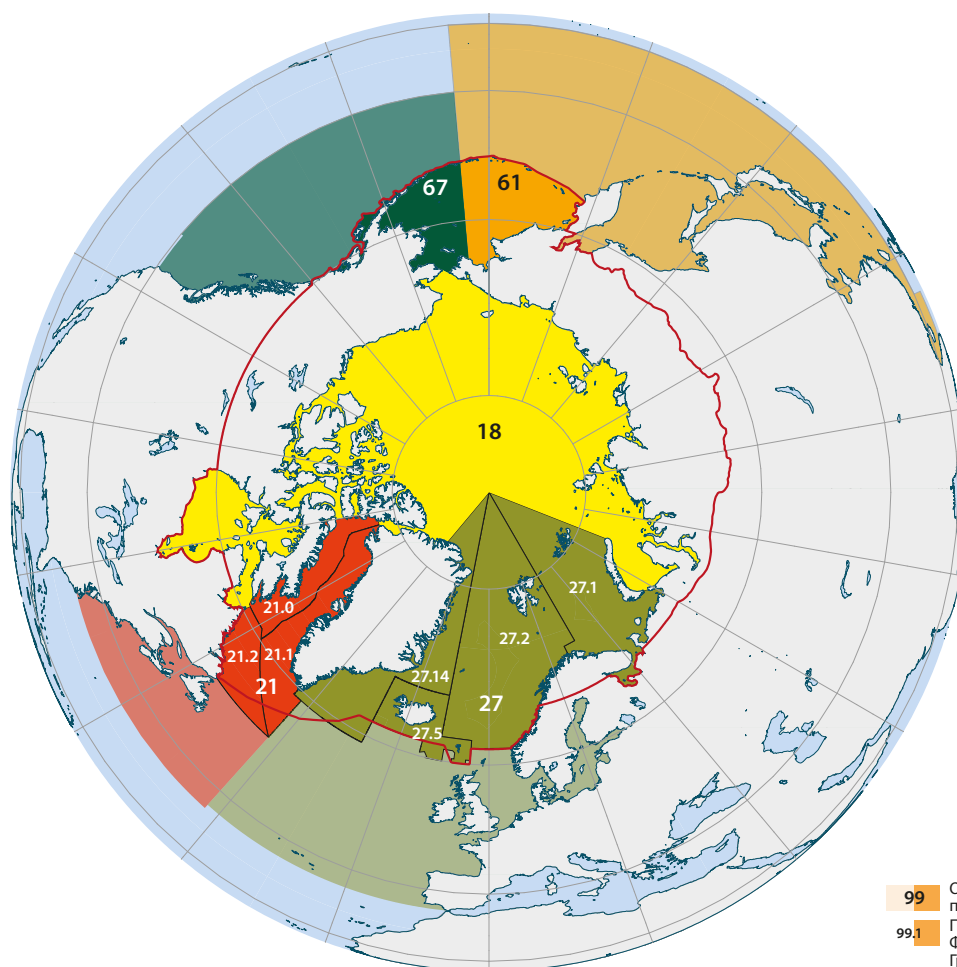
Corey Arnold



Bryan and Cherry Alexander



Christophe Boisvieux / Corbis



▲ Районы промысла в арктических водах (числа обозначают номера рыболовных районов Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН – ФАО).

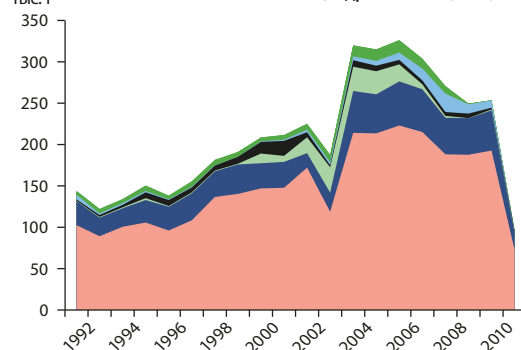
99 Основные районы промысла ФАО
 99.1 Подрайоны промысла ФАО
 — Граница Арктики, используемые АМАП

РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

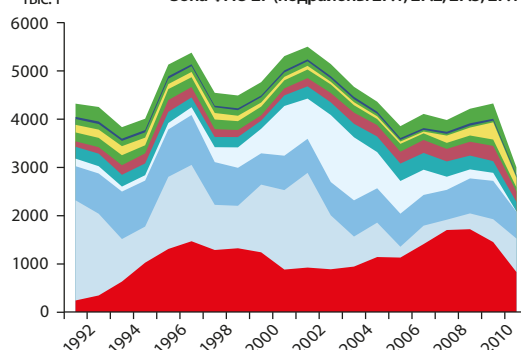
Основываясь на текущем понимании закисления Северного Ледовитого океана (стр. 1–15) и биологических реакций (стр. 16–21), а также на знании современного **регионального арктического рыболовства**, можно сделать ряд выводов:

- Если закисление океана интенсивнее в поверхностных водах, чем в глубоких слоях, следовательно, **шельфовые виды** могут быть затронуты в большей степени по сравнению с глубоководными видами.
- Если последствия закисления океана являются более серьезными в зоне таяния морского льда, то **районы низкоширотной Арктики** могут быть подвержены большему влиянию по сравнению с высокоширотными регионами.
- Если пищевые цепи являются менее сложными в районах низкоширотной Арктики, чем в высокоширотных регионах, то негативное влияние на состав и общий объем вылова может быть больше для **морского рыболовства в низкоширотной Арктике**.
- Если моллюски являются более восприимчивыми к воздействию закисления океана, чем других промысловые виды, то **рыбный промысел в северо-западной Атлантике** (который в большей мере зависит от двустворчатых и брюхоногих моллюсков) может страдать больше, чем в северо-восточной Атлантике.
- Если закисление океана влияет, главным образом, на ракообразных и моллюсков на более низких трофических уровнях, то **любительское рыболовство** может почти не пострадать, за исключением некоторых косвенных воздействий, распространяющихся по пищевым цепям.

Улов, тыс. т Зона ФАО 21 (подрайоны 21.0, 21.1, 21.2)



Улов, тыс. т Зона ФАО 27 (подрайоны 27.1, 27.2, 27.5, 27.14)



Путассу
 Мойва
 Треска
 Палтус
 Пикша
 Сельдь
 Скумбрия
 Красная рыба
 Сайда
 Ракообразные
 Креветка
 Другие

▲ Уловы основных видов в арктических рыболовных районах ФАО 21 и 27.



Yukon Council of First Nations



© B&C Alexander / ArcticPhoto

Валовой региональный продукт (по паритету покупательной способности) на душу населения в 2005 г.



КОРЕННЫЕ НАРОДЫ И МЕСТНЫЕ ОБЩИНЫ

Закисление океана представляет потенциальную опасность для пищевых систем Арктики, культуры и уровня жизни. Некоторые традиционные виды питания могут быть подвержены его прямому воздействию. Другие могут быть невосприимчивы к прямому влиянию, но испытывать воздействие «волновых эффектов» в пищевых цепях. (Для объяснения прямых и косвенных эффектов см. стр. 17.) Имеющиеся факты дают основания полагать, что:

- Промысловые виды, которые, **крайне вероятно**, будут **напрямую** затронуты закислением океана: моллюски и морские гребешки.
- Промысловые виды, на которые, **очень вероятно**, будет **напрямую** влиять закисление океана: крабы, креветки, омары и норвежские лобстеры / лангустины.

Промысловым видом с **высоким риском косвенных** (связанных с добычей) эффектов является атлантическая зубатка (океанический сом), потому что в ее рацион входят животные, считающиеся крайне или очень вероятно подверженными прямому влиянию закисления.

Следующие промысловые виды подвергаются **средней степени риска от косвенных** (связанных с подвергшейся воздействию закисления добычей) эффектов:

- Рыба: камбала-ерш; красная рыба; арктический голец; пикша; атлантическая треска, палтус, скумбрия; лосось; путассу, сельдь; морская щука; муксун, сибирский осетр, менёк; мойва.
- Краб.
- Морские млекопитающие: лахтаки, тюлени и хохлачи; моржи; нарвалы; гренландские тюлени и нерпы; гренландские киты; котики, дельфины, морские львы.
- Морские птицы: полярные крачки, утки, чайки, гаги, гагарки, толстоклювая кайра, чистик.

ПРОБЕЛЫ В ЗНАНИЯХ И МЕРЫ ПО УПРАВЛЕНИЮ: СЛЕДУЮЩИЕ ШАГИ

Программы мониторинга закисления Северного Ледовитого океана и изучения его последствий должны быть разработаны с учетом уникальных природных условий и культуры Крайнего Севера. Эффективное реагирование на изменяющиеся условия требует внимания к общей гибкости экосистем и их устойчивости.

АРКТИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Арктика является одним из **наиболее быстро меняющихся** регионов Земли, но он также и один из самых **слабо изученных и наименее понятых**. Необходимы многолетние регулярные наблюдения.

- Мониторинг карбонатной системы морских вод должен:
 - Проводиться синхронно с контролем изменений других ключевых переменных (таких как кислород и биогенные элементы).
 - Сочетаться с физическими и биологическими наблюдениями.
 - Проводиться с судов и наземных платформ (стационарных и мобильных).
- Для экстремальных арктических условий должны быть разработаны новые измерительные приборы.
- Характеристики платформ для наблюдений, логистика мониторинга и обработка данных должны быть скоординированы на международном уровне.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Информация о воздействии закисления океана на ключевые арктические виды и процессы практически отсутствует, поэтому крайне необходимо выполнение целенаправленных исследований. Приоритетным является:

- Исследование прямых и косвенных воздействий на арктические и субарктические организмы, в том числе, на ключевые виды пищевой цепи и коммерчески важные виды.
- Проведение экспериментов в натуральных условиях (то есть в океане, а не в лабораториях) и в экологически значимые сроки.
- Оценка потенциала арктических организмов для акклиматизации на всех этапах жизни и адаптации за время жизни нескольких поколений.
- Исследование влияния многократных и синхронных изменений окружающей среды на процессы как видового, так и экосистемного уровня.

ВАЖЕН МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД

СОЦИАЛЬНО- ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Экономисты и социологи используют теоретическое и численное моделирование вместе с разработкой сценариев для изучения социальных последствий закисления океана. Для подготовки всесторонних и достоверных оценок происходящих изменений потребуются **дополнительные научные данные**.

В свете нынешнего понимания закисления океана, арктической культуры и морских ресурсов, рекомендуются следующие **меры по управлению**:

- Создание морских охраняемых районов, тщательно выбранных и предназначенных для повышения устойчивости среды обитания и поддержки популяций рыбы и моллюсков для обеспечения устойчивого улова.
- Разработка стратегий устойчивого развития и туризма.
- Развитие инициатив регулирования на экосистемной основе.

Дополнительные соображения:

- Рыбные запасы будут более устойчивыми к закислению океана, если другие стрессы будут сведены к минимуму (например, чрезмерный вылов рыбы и деградация среды обитания).
- Гибкое управление аквакультурой (например, выбор устойчивых к закислению видов) может повысить экономические и социальные возможности.
- Привлечение традиционных знаний в рамках долгосрочного совместного подхода к управлению рыболовством было бы полезно.

Так как закисление океана происходит одновременно с другими крупномасштабными и стремительными изменениями окружающей среды, **должно осуществляться регулирование морских экосистем для увеличения их устойчивости**.

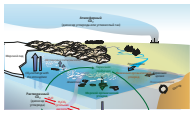
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ
МОРСКИЕ ЭКОСИСТЕМЫ
ДОЛЖНЫ БЫТЬ УПРАВЛЯЕМЫ

ПЕРВЫЙ ОЦЕНОЧНЫЙ ДОКЛАД АМАП ПО ЗАКИСЛЕНИЮ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА: 10 ВЫВОДОВ

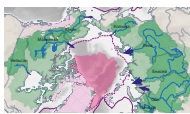
Закисление Северного Ледовитого океана



1. Происходит крупномасштабное и быстрое закисление арктических морских вод. Последние гидрохимические измерения в некоторых районах Северного Ледовитого океана указывают на значительные темпы закисления. Сочетание закисления океана и таяния льда ведет к другим широко распространенным изменениям в химическом составе морской воды, особенно в верхнем слое океана.



2. Основная движущая сила закисления океана – поглощение углекислого газа, выделяемого в атмосферу в результате антропогенной деятельности. Сжигание богатых углеродом веществ, таких, как уголь или нефть, приводит к выделению углекислого газа в атмосферу. Океаны поглощают часть этого газа, и в результате происходит увеличение кислотности морской воды. Средняя кислотность поверхностных вод Мирового океана в настоящее время приблизительно на 30% 14 выше, чем до начала индустриальной революции.

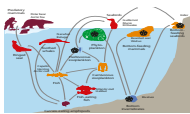


3. Воды Северного Ледовитого океана особенно подвержены закислению. СЛО холодный, а его морской ледяной покров уменьшается. Оба этих фактора способствуют поступлению диоксида углерода из воздуха в океан. Кроме того, СЛО получает большое количество пресной воды с речным стоком и из-за таяния льда. В результате арктические морские воды менее эффективны в химической нейтрализации подкисляющего воздействия углекислого газа.



4. Закисление вод Северного Ледовитого океана неоднородно. В то время как поглощение углекислого газа морской водой является основным фактором, другие процессы также могут влиять на локальные темпы и масштабы закисления океана. Реки, морской лед, береговые и морские донные отложения, биологическая продукция и разложение органического вещества также могут сыграть свою роль. Вклад этих процессов изменяется от места к месту, от сезона к сезону и из года в год.

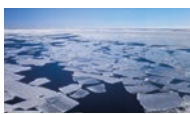
Биологические последствия закисления океана



5. Арктические морские экосистемы, весьма вероятно, подвергаются значительному изменению из-за закисления океана. Арктические морские экосистемы, в целом, характеризуются короткими, простыми пищевыми цепями, которые значительно зависят от определенных ключевых видов. Некоторые из этих ключевых видов могут быть чувствительны к закислению океана. В настоящее время недостаточно данных, чтобы оценить точно характер и степень уязвимости арктических экосистем. Крайне необходимы долгосрочные, специфические для Арктики исследования.

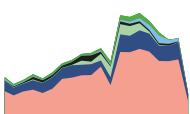


6. Закисление океана будет иметь прямые и косвенные последствия для арктических морских обитателей. Вполне вероятно, что некоторые морские организмы будут положительно реагировать на новые условия, связанные с закислением океана, в то время как другие будут в невыгодном положении, и, возможно, близки к локальному исчезновению. Примеры прямого воздействия включают в себя изменения в скорости роста, формировании раковин или поведении животных. Примеры косвенных эффектов включают в себя изменения в запасах пищи, хищных видах или пригодной для жизни среды обитания.



7. Влияние закисления океана следует оценивать в контексте других изменений, происходящих в арктических водах. Арктические морские организмы испытывают не только закисление океана, но также и другие значительные одновременные изменения – например, изменение климата, промыслового рыболовства и привычной среды обитания. Так как различные формы морской жизни реагируют по-разному, набор растений и животных изменится, так же, как и их взаимодействие друг с другом.

Потенциальное экономическое и социальное влияние закисления океана на рыбный промысел в Арктике



8. Закисление океана является одним из нескольких факторов, которые могут способствовать изменению видового состава рыб в СЛО. Закисление океана, вероятно, влияет на многообразие, продуктивность и распределение морских видов, но величина и направление изменения являются неопределенными. Другими процессами, определяющие изменения в Арктике, является повышение температуры, уменьшение площади (и толщины) морского льда и снижение солености поверхностных вод.

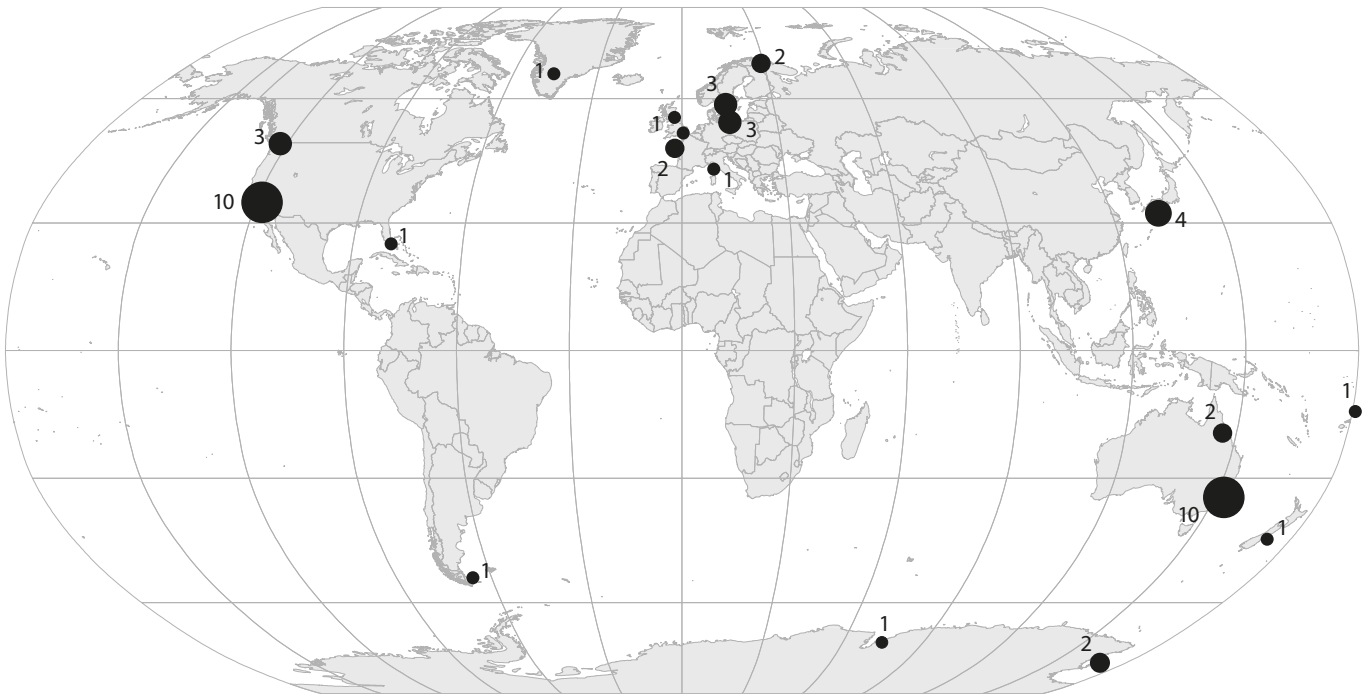
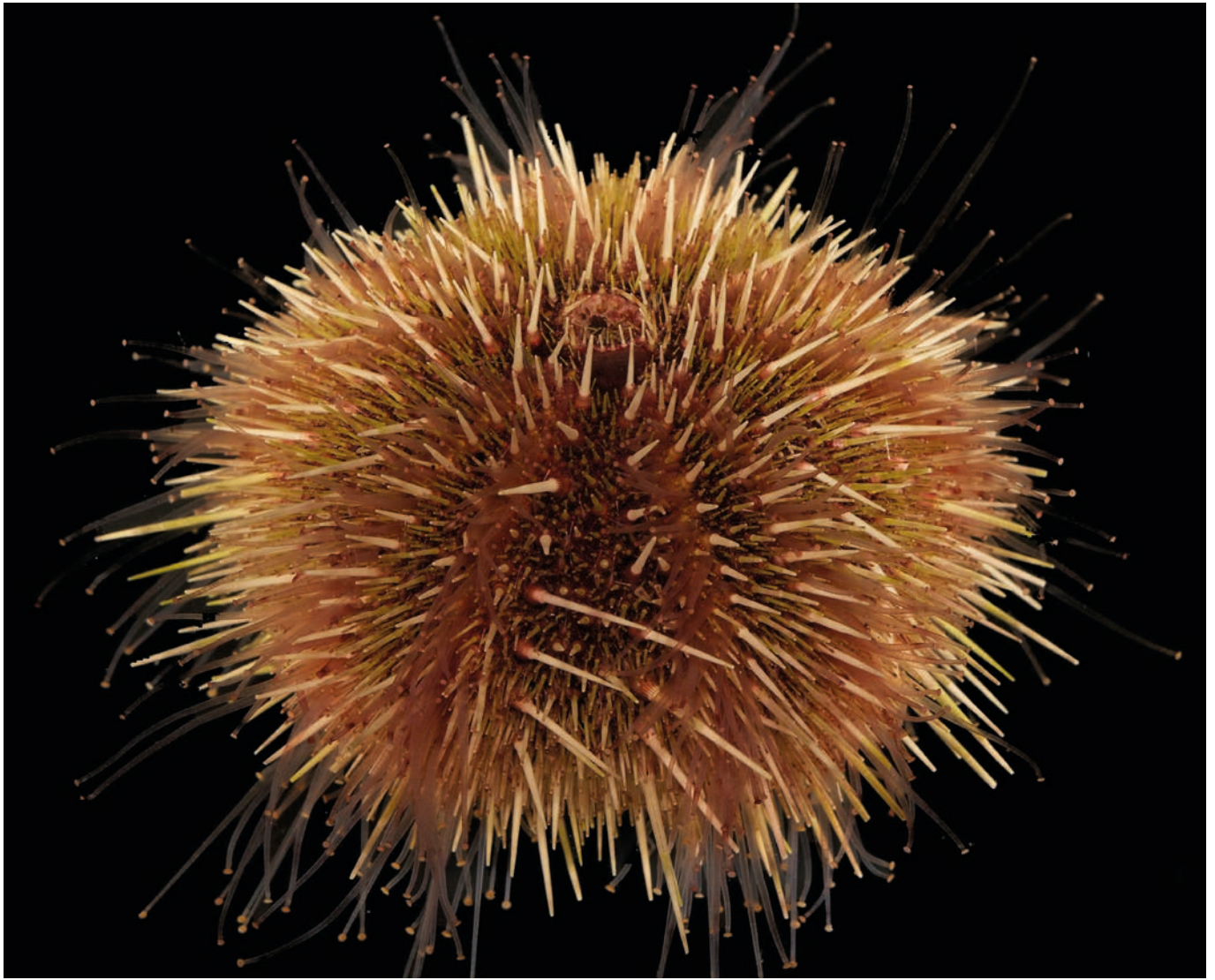


9. Закисление океана может влиять на рыбный промысел в СЛО. В нескольких исследованиях выполнена оценка социально-экономических последствий закисления океана для рыболовства, особенно арктического. Коммерчески важные арктические запасы рыбы могут быть затронуты закислением океана, но величина и направление таких изменений являются неопределенными. Рыбные запасы могут быть более устойчивыми к закислению океана, если другие стрессы, такие, как чрезмерный вылов рыбы и деградации среды обитания, сведены к минимуму.



10. Изменения экосистемы, связанные с закислением океана, могут повлиять на уровень жизни северных народов. Морские уловы северных прибрежных общин включают виды, которые, вероятно, будут затронуты закислением океана. Улов большинства групп коренных народов состоит из целого ряда морских видов, поэтому они могут компенсировать неблагоприятное воздействие закисления путем перехода к большей доле вылова видов, незатронутых закислением, или тех, на которые закисление повлияло положительно. Изменение выловов может повлиять на некоторые сезонные или культурные практики, а уловы любительского рыболовства могут изменить свой состав. Морские млекопитающие могут быть косвенно затронуты за счет изменения пищевых запасов.

¹⁴ В соответствии с докладом Первой Рабочей Группы МГЭИК, величина pH поверхностных вод океана уменьшилась на 0.1 ед. pH с начала индустриальной эпохи, что соответствует увеличению концентрации ионов водорода на 26%.



Информация об арктических видах и экосистемных процессах крайне ограничена (см стр. 17 и стр. 25). Это иллюстрируется на примере морских ежей. Цифры на карте показывают число опубликованных исследований. Источник: Сэм Дюпон, Университет Гетеборга.

Подписано в печать 22.01.2016
Формат 60×84 1/8
Тираж 200 экз.

Печать цифровая
Печ. л. 5,0
Заказ № 86

Типография издательства Санкт-Петербургского политехнического университета
Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

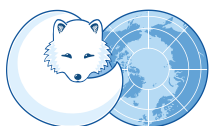
Секретариат АМАР

Gaustadalléen 21
N-0349 Осло, Норвегия

T +47 21 08 04 80

F +47 21 08 04 85

www.amap.no



ARCTIC COUNCIL

AMAP
Arctic Monitoring and
Assessment Programme

