

Горячий, кислый и задыхающийся – океан в условиях стресса



Настоящая статья публикуется повторно с разрешения Плимутской морской лаборатории¹

Как поживает самая большая экосистема на Земле?

Океан занимает почти три четверти поверхности Земли, вмещает 96 процентов ее жизненного пространства, обеспечивает приблизительно половину всего объема кислорода, которым мы дышим, и играет все более важную роль в качестве источника белка для быстро растущего населения мира. Однако деятельность человека оказывает воздействие на этот особо ценный ресурс в локальном, региональном и глобальном масштабах.

В течение грядущих десятилетий и веков состояние океана будет все больше подвергаться стрессу в результате воздействия, по меньшей мере, трех взаимодействующих факторов. Рост температуры воды в океане, закисление океана и обескислороживание океана вызовут существенные изменения в его физических свойствах, химическом и биологическом составе. Эти изменения окажут такое влияние на океан, особенности которого мы только начинаем понимать.

Очень важно, чтобы международные директивные органы понимали огромную роль, которую океан играет в поддержке жизни на Земле, а также последствия высокой концентрации CO_2 в атмосфере для океана и людей.

1 – Закисление океана

Закисление океана вызвано непосредственно ростом уровней концентрации углекислого газа (CO_2) в атмосфере. Поступая в океан, CO_2 быстро вовлекается в ряд химических реакций, в результате чего повышается кислотность в поверхностном слое океана (при этом понижается значение показателя pH). За последние 250 лет океан уже поглотил около 30 процентов CO_2 , выброшенного в атмосферу в результате деятельности человека, понижая значение показателя pH темпами, не виданными около 60 миллионов лет.

Такое воздействие океана можно считать полезным, так как оно замедляет накопление CO_2 в атмосфере и темпы глобального потепления; без такого поглотителя, как океан, уровень концентрации CO_2 в атмосфере уже превысил бы 450 частей на миллион. Однако продолжение такого радикального и быстрого изменения в химическом составе океана, похоже, не предвещает ничего хорошего для жизни в океане; оно не только создаст проблемы для многих организмов с кальциево-карбонатным скелетом или панцирем (таких как устрицы, моллюски и некоторые виды планктона), но также окажет воздействие на многие другие организмы, экосистемы и процессы с потенциально серьезными последствиями для человеческого общества.

Среднее значение величины pH в верхнем слое океана уже уменьшилось приблизительно на 0,1 единицы (при 30-процентном росте кислотности) со времени индустриальной революции, и к концу этого столетия ожидается его дальнейшее уменьшение приблизительно на 0,3 единицы, если выбросы CO_2 продолжатся нынешними темпами.

2 – Потепление океана

В течение последних десятилетий потепление океана является прямым следствием роста атмосферной температуры, вызванного «парниковым эффектом». Это потепление оказывает влияние на обмен газами между поверхностью океана и атмосферой и их перенос и аккумуляцию в более глубоких слоях океана. В более теплом океане будет в меньшей степени осуществляться перемешивание между богатыми биогенными веществами глубинными водами и небогатыми биогенными веществами поверхностными водами, особенно в тропических районах, вызывая пагубные последствия для продуктивности океана, что в результате приведет к значительному снижению продовольственной безопасности в части рыбного промысла.

Потепление океана также, вероятно, окажет прямое воздействие на физиологию морских организмов и таким образом изменит географическое распределение видов, включая виды, имеющие промысловое значение, которые в настоящее время хорошо адаптировались к существующим условиям; например, повышение

¹ By C. Turley, T. Keizer, P. Williamson, J.-P. Gattuso, P. Ziveri, R. Monroe, K. Boot and M. Huelsenbeck of the Plymouth Marine Laboratory, UK Ocean Acidification Research Programme, European Project on Ocean Acidification, Mediterranean Sea Acidification in a Changing Climate project, Scripps Institution of Oceanography at UC San Diego, OCEANA; 2013 6pp. ISBN: 978-0-9519618-6-5 (available at www.oceanunderstress.com).

температуры почти наверняка поспособствует сокращению численности трески в северной части Атлантического океана.

В океане содержится огромное количество тепла, при этом приблизительно 90 процентов энергии от потепления планеты Земля накопилось в нем в последние десятилетия. За последние 100 лет средняя температура поверхности океана уже повысилась приблизительно на 0,7 °С, а концу этого столетия в некоторых районах она, вероятно, повысится более чем на 3 °С.

3 – Обескислороживание океана

Обескислороживание океана означает сокращение количества растворенного кислорода (O_2) в океанских водах. Изменение климата может оказывать влияние на уровень содержания кислорода в океане различным образом. Обескислороживание определенно будет иметь место в более теплом океане, так как более высокие температуры снижают способность кислорода к растворению. Вероятно, потепление также сделает океан более стратифицированным, уменьшая поступление кислорода от поверхностного слоя к более глубинным слоям. Закисление океана и обогащенный биогенными веществами речной сток также способствуют обескислороживанию океана.

Для жизни рыб и других морских организмов необходим достаточный уровень кислорода, и, таким образом, уменьшение концентрации кислорода в воде может подвергать их существование стрессу. Расширение зон с низким содержанием кислорода может привести к утрате этих организмов. Однако популяция других организмов, устойчивых к условиям низкой концентрации кислорода в воде, вероятно, значительно увеличится, нарушая, таким образом, равновесие между видами. Низкий уровень концентрации кислорода в океане может также привести к увеличению концентрации парниковых газов в атмосфере за счет изменения механизмов обратной связи с участием метана и закиси азота.

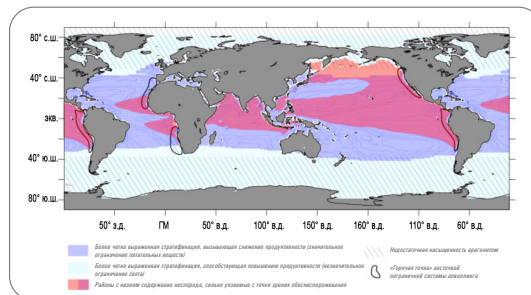
Существующие модели океана прогнозируют снижение концентрации кислорода в океане на глобальном уровне на 1–7 процентов в течение следующего столетия. Однако в отношении масштаба и мест изменений в концентрации кислорода и также их экологического воздействия отмечаются значительные неопределенности.

Тройная проблема – несколько факторов стресса

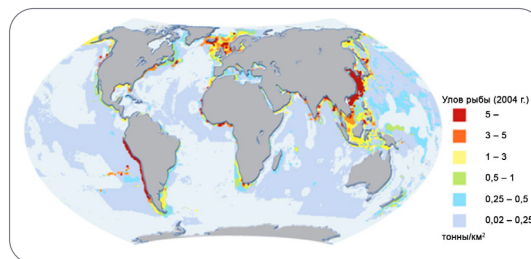
В будущем многие части океана, вероятно, подвергнутся воздействию двух и более стресс-факторов окружающей среды одновременно, так эти факторы обусловлены одним и тем же процессом – ростом в атмосфере концентрации CO_2 и других парниковых газов. В таких «горячих точках» океан будет не только более теплым, но и более стратифицированным, с повышенной кислотностью и пониженным содержанием кислорода, повышая стрессовое воздействие на океанскую флору и фауну таким образом, что это приведет к более сильному эффекту, чем эффект, обусловленный простым добавлением каждого фактора.

Например, закисление океана может сделать некоторые виды более чувствительными к воздействию

более теплой воды, а более высокая концентрация CO_2 наряду с более низким содержанием кислорода может создать затруднения для дыхания. Эти факторы стресса, действуя совместно, могут быстрее создать угрозу для биохимических циклов, экосистем и товаров и услуг, которые океан обеспечивает для людей, подвергая тем самым повышенному риску продовольственную безопасность человека и отрасли промышленности, зависящие от продуктивных морских экосистем. Более того, изменения в обмене газами между атмосферой и океаном окажут воздействие на изменение климата.



Николас Грубер, *Phil. Trans. R. Soc. A* (2011 г.) 369, 1980–1996 гг.



ЮНЕП 2010 г. Новые проблемы ЮНЕП: Последствия для окружающей среды, вызванные изменениями в океане

Является важным и вызывает озабоченность тот факт, что такие «горячие точки», где действуют несколько факторов стресса, вероятно, совпадают с районами высокой продуктивности океана, которые в настоящее время поддерживают развитый рыбный промысел и натуральное рыбное хозяйство в развивающихся странах (см. карты).

Шаги, которые необходимо предпринять

Смягчение воздействия на окружающую среду: Так как закисление океана вызвано, главным образом, наличием CO_2 в атмосфере, необходимы эффективные меры по смягчению воздействия на окружающую среду, чтобы сократить его выбросы. Накопление в атмосфере других парниковых газов также должно быть ограничено, так как все они способствуют потеплению океана и, следовательно, его обескислороживанию.

Адаптация: Необходимо разрабатывать стратегии адаптации, так как мир уже принял на себя значительную долю дополнительного тепла, закисления и обескислороживания, даже если содержание CO_2 в атмосфере могло бы быть стабилизировано на сегодняшнем уровне. Ключевая стратегия состоит в том, чтобы обеспечить максимальный потенциал для устойчивости системы, например, посредством поддержания на сегодняшнем уровне или даже увеличения биоразнообразия и сохранения разнообразных сред обитания. Уменьшение воздействия других стресс-факторов окружающей среды, таких как прибрежная евтрофикация и загрязнение органическими и неорганическими веществами, также принесет пользу. Однако принимая во внимание

беспрецедентные темпы изменений, сомнительно, чтобы только мер по адаптации без смягчения воздействия на окружающую среду оказалось достаточно, чтобы избежать большей части ущерба.

Научные исследования: Научные исследования необходимы, чтобы повысить уровень нашего знания и понимания этих трех взаимосвязанных факторов стресса. Например, если закисление океана недавно стало рассматриваться в качестве темы научных исследований, имеющей высокий приоритет, то проблема обескислороживания пока такого уровня признания не получила.

Чего действительно не хватает, так это общего подхода, в рамках которого исследуются комбинированные воздействия двух или всех трех факторов стресса, действующих одновременно. Подробные лабораторные

исследования и полевые эксперименты с использованием мониторинга и моделирования в масштабах от регионального до глобального уже начинаются в рамках междисциплинарного и международного сотрудничества и партнерства. Важно отметить, что потенциал для научных исследований необходимо увеличивать по всему миру, особенно в уязвимых развивающихся странах.

Чтобы лучше понимать последствия для экосистем и каждого из нас, в научных исследованиях все более следует использовать междисциплинарный подход, который бы охватывал физические, медико-биологические, химические, геологические, социальные и экономические науки. Исследования должны быть актуальными с точки зрения политики и предусматривать оперативный обмен знаниями между исследователями и лицами, принимающими решения.

Справочник с описанием стресса, которому подвергается океан

Какие изменения произойдут в океане в этом столетии без неотложного и существенного сокращения выбросов парниковых газов

Фактор стресса	Причины	Результат	Непосредственный эффект	Последствия	Обратная связь с климатом
Потепление <ul style="list-style-type: none"> Проблема относительно широко изучена с точки зрения физического взаимодействия и биологии, но мало изучена с точки зрения экосистем в целом. 	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение выбросов парниковых газов в атмосферу 	<ul style="list-style-type: none"> Повышение температуры, особенно близко к поверхности Ослабление перемешивания вод в океане в связи с более частой стратификацией Увеличение слоя и толщины морского льда (будет способствовать отражению вод в Арктике) 	<ul style="list-style-type: none"> Снижение способности углекислого газа к растворению Повышение скорости химических и биологических процессов Сокращение пополнения природной биомассы фитопланктона в более стратифицированных водах 	<ul style="list-style-type: none"> Стресс для физиологии организмов, включая обезвоживание кораллов Широкомасштабные миграции видов Более быстрый цикл органического вещества Стресс для фитопланктона с точки зрения биологической продуктивности, особенно в теплых водах Изменения в биомассе, структуре, продуктивных цепях и в продуктивности с потенциальными последствиями для рыболовства, укреплений берегов и туризма 	<ul style="list-style-type: none"> Сокращение поступления океаном углекислого газа из-за снижения способности углекислого газа к растворению Увеличение потребления углекислого газа и уменьшение морской биомассы в глубоководных слоях океана Потенциальное сокращение количества угля, добываемого во внутренних зонах океана Уменьшение продуктивности, кроме Арктики, где сокращение морского льда может привести к ее увеличению
Закисление <ul style="list-style-type: none"> Проблема изучена в значительной степени, но в прошлом десятилетии 	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение выбросов парниковых газов в атмосферу Обескислороживание океана 	<ul style="list-style-type: none"> Распределение быстрого и медленного химических составов океана с точки зрения сохранения карбоната Большая часть океана будет испытывать отрицательное воздействие на панцири животных и кораллы, при этом в Арктике это воздействие проявится раньше (к 2028 г.) 	<ul style="list-style-type: none"> Уменьшение скорости роста и толщины раковин моллюсков Изменения в содержании углерода и азота в составе органического вещества 	<ul style="list-style-type: none"> Загрязнение для рыболовства и физиологический стресс для многих видов, в том числе и на ранних стадиях развития Изменения в биоразнообразии и экосистемах, а также токсичности и продуктивности океана Изменения в водной экосистеме, в частности, в результате воздействия ключевых рыбных промыслов и видов в экваториальной зоне, в частности, особенно уязвимыми 	<ul style="list-style-type: none"> Сокращение поступления океаном углекислого газа из-за химических воздействий Изменения в составе углерода во внутренних зонах океана Более интенсивное использование углерода во всем океане в результате сокращения органического вещества
Обескислороживание <ul style="list-style-type: none"> Новая проблема, мало изучена 	<ul style="list-style-type: none"> Снижение способности кислорода к растворению из-за потепления Сокращение поступления кислорода во внутренние зоны океана из-за ослабления перемешивания вод Обескислороживание в результате биогенных химических взаимодействий, стимулирующей ускорение кислорода на местах 	<ul style="list-style-type: none"> Меньше кислорода для дыхания, особенно в продуктивных районах и во внутренних зонах океана Расширение зон с низким и очень низким содержанием кислорода 	<ul style="list-style-type: none"> Сокращение роста и выживаемости моллюсков, рыб и других организмов, которым необходим кислород Сокращение доступности 	<ul style="list-style-type: none"> Стресс для организмов, которым необходим кислород Риск утраты видов в районах с низким содержанием кислорода Шансы на успешность воспроизводства Сдвиги в сторону организмов, устойчивых к условиям низкого содержания кислорода в воде, особенно в экваториальных, и утрате чувствительных видов в этих районах 	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение выработки двух парниковых газов – метана и закиси азота
Все три фактора вместе <ul style="list-style-type: none"> Мало исследован 	<ul style="list-style-type: none"> Увеличение выбросов парниковых газов, особенно углекислого газа, в атмосферу 	<ul style="list-style-type: none"> Воды, которые не только теплее, но и имеют более высокую кислотность и более низкий уровень кислорода, будут более благоприятными для 	<ul style="list-style-type: none"> Угроза для физиологии, репродуктивного здоровья и формирования панциря организмов, например раковин моллюсков и коралловых рифов 	<ul style="list-style-type: none"> Обескислороживание океана может привести к снижению температурной устойчивости организмов, повышению воздействия кислотности Комбинированные воздействия и дальнейшему повышению риска для продуктивности биомассы и отравлений промышленностью, зависящих от здоровья и продуктивности экосистем 	<ul style="list-style-type: none"> Будущие изменения в физических свойствах, химическом составе и биологической океане Риск многократных положительных обратных связей с климатом, способствующих увеличению количества будущего парниковых газов