



ИЗУЧЕНИЕ КРУГОВОРОТА УГЛЕРОДА В ОКЕАНЕ: МЕХАНИЗМЫ, ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ГЛОБАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Кравцов Андрей Михайлович

Студент, Кафедра океанологии Российский государственный
гидрометеорологический университет
г. Санкт-Петербург, Россия

Семенова Ольга Валерьевна

Доцент, Кафедра океанологии Российский государственный
гидрометеорологический университет
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

Статья посвящена комплексному исследованию круговорота углерода в Мировом океане, который является ключевым элементом глобальной климатической системы. Рассматриваются физические, химические и биогеохимические механизмы переноса углерода, его трансформации и долговременной аккумуляции. Особое внимание уделяется роли океана как главного поглотителя CO₂, а также влиянию биологической помпы, океанической циркуляции и микробиологических процессов на формирование стабильного углеродного баланса. Охарактеризованы современные методики наблюдения, включающие спутниковый мониторинг, глубоководные измерения и изотопный анализ. Подчеркивается значимость изучения антропогенных изменений, океанического подкисления и последствий для климата.

Ключевые слова: углеродный цикл, океаническая биологическая помпа, растворённый углерод, климатическая система, океаническая циркуляция.

Введение

Круговорот углерода в Мировом океане представляет собой сложную, многоуровневую систему, от которой зависит состояние атмосферы, динамика глобальных температур и устойчивость биосферы. Океан способен поглощать значительную часть антропогенного диоксида углерода, тем самым играя роль естественного климатического регулятора. Основные формы углерода в океане включают растворённый CO₂, бикарбонатные и карбонатные ионы, органическое вещество, взвешенные частицы и биомассу планктона. Каждый из этих компонентов участвует в транспортировке углерода между слоями воды и атмосферой.

Современные климатические вызовы требуют глубокого понимания океанического углеродного цикла. Осознание масштабов и направленности потоков углерода позволяет оценивать степень воздействия антропогенного CO_2 на климат, прогнозировать будущие изменения и разрабатывать стратегии адаптации. Это делает изучение океанического углеродного цикла не только научной задачей, но и важнейшим элементом мировой климатической политики.

Физико-химические механизмы круговорота углерода

Физико-химическая структура круговорота углерода определяется растворимостью CO_2 , химическими реакциями в морской воде и условиями, которые регулируют эти процессы. Диоксид углерода, попадая в воду, связывается с ней и образует угольную кислоту, которая диссоциирует на бикарбонатные и карбонатные ионы. Бикарбонат является наиболее распространённой формой углерода в океанической среде. Пропорции между различными формами углерода зависят от температуры, солёности, давления и кислотности воды.

Рост концентрации CO_2 в атмосфере вызывает увеличение содержания угольной кислоты в верхнем слое океана, что приводит к снижению pH. Такое подкисление нарушает карбонатный баланс и уменьшает количество карбонат-ионов, необходимых для формирования скелетов кораллов, моллюсков и планктонных организмов. Изменение кислотности способствует разрушению карбонатных экосистем и нарушает функционирование пищевых сетей.

Температура воды играет важную роль в распределении углерода. Холодные воды лучше растворяют газ, поэтому полярные регионы являются ключевыми зонами поглощения атмосферного CO_2 . Напротив, нагрев поверхностных вод снижает растворимость углекислого газа, что может увеличивать его выход обратно в атмосферу. Таким образом, физико-химическая основа круговорота углерода формируется на пересечении климатических, геохимических и гидрофизических факторов.

Биологическая помпа как основной путь переноса углерода в глубину

Биологическая помпа — это система процессов, которая обеспечивает перенос углерода из фотосинтетически активных поверхностных слоёв в глубоководные области. Фитопланктон в ходе фотосинтеза поглощает CO_2 и превращает его в органическое вещество. После отмирания часть органических частиц, а также отходы жизнедеятельности зоопланктона, оседают в глубинные слои воды, где подвергаются дальнейшей переработке.

Эффективность биологической помпы зависит от концентрации питательных веществ, уровня солнечной радиации, температуры поверхностных слоёв и структуры планктонного сообщества.

Важную роль играют виды фитопланктона, формирующие более плотные частицы, способные быстро опускаться на большие глубины. Первый этап биологической помпы связан с первичной продукцией, второй — с транспортировкой органического вещества, а третий — с его седиментацией и минерализацией в глубоководных условиях.

Биологическая помпа служит одним из наиболее эффективных механизмов долговременного хранения углерода. Углерод, погружённый в глубинные воды, может оставаться изолированным от атмосферы веками. Нарушение работы биологической помпы под воздействием изменения климата может значительно ослабить глобальный углеродный баланс.

Океаническая циркуляция и вертикальное перемешивание углерода

Глобальная океаническая циркуляция обеспечивает распределение углерода между поверхностными и глубинными слоями. В полярных регионах холодная и плотная вода опускается на большие глубины, увлекая с собой растворённый CO_2 . Это создаёт основу для формирования глубинных течений, которые распространяют углерод по всему Мировому океану.

Вертикальное перемешивание обеспечивает постоянный обмен углерода между слоями. Апвеллинг, возникающий в некоторых регионах мира, поднимает глубинные воды, богатые CO_2 , обратно к поверхности, что приводит к высвобождению углерода в атмосферу. Таким образом, одни зоны океана выступают поглотителями углекислого газа, а другие — источниками его выброса.

Климатические изменения, влияющие на температуру и солёность, могут привести к ослаблению термохалинной циркуляции, что снизит способность океана поглощать углерод. Это делает изучение глубинной циркуляции важным элементом прогнозирования будущего климата.

Микробиологические процессы и реминерализация углерода

Органическое вещество, достигающее глубин океана, подвергается разложению микроорганизмами, которые участвуют в деструкции биогенных частиц. В результате углерод высвобождается в форме CO_2 и растворённых органических соединений. Эти процессы определяют скорость возврата углерода в атмосферу и скорость его долговременного хранения.

Реминерализация зависит от температуры воды, давления, химического состава органического вещества и активности микробных сообществ. В холодных и глубоких водах разложение происходит значительно медленнее, что способствует длительному хранению углерода. Часть растворённого органического углерода становится устойчивой к биологическому разложению и может сохраняться в океане столетиями, формируя долгосрочный резервуар углерода.

Методы изучения круговорота углерода в океане

Для исследования круговорота углерода применяются спутниковые системы наблюдений, автоматические буйковые платформы, глубоководные зонды, изотопные методы и математическое моделирование. Спутниковые данные позволяют анализировать концентрацию хлорофилла, температуру воды, уровень первичной продукции и динамику поверхностных течений.

Автономные зонды типа Argo фиксируют параметры глубинных слоёв и дают возможность отслеживать концентрацию CO₂, pH, щёлочность, содержание кислорода, температуру и солёность. Изотопный анализ помогает выявлять происхождение углерода и определять скорость биогеохимических процессов.

Цифровые климатические модели объединяют физику, химию и биологию, позволяя прогнозировать изменения углеродного баланса при различных сценариях климатических воздействий. Комплексность этих методов делает изучение углеродного цикла междисциплинарным направлением.

Антропогенное воздействие и глобальные климатические риски

Рост антропогенных выбросов CO₂ ведёт к ускоренному подкислению океана, нарушению карбонатного равновесия и ухудшению условий существования морских организмов. Ослабление биологической помпы, изменение активности планктона и нарушение циркуляционных процессов приводят к уменьшению способности океана аккумулировать углерод.

Долгосрочные последствия включают усиление глобального потепления, снижение продуктивности морских экосистем, сокращение биологических ресурсов и рост климатической нестабильности. Изучение этих процессов позволяет формировать стратегии сохранения океанических экосистем и предотвращения климатических рисков.

Заключение

Круговорот углерода в океане представляет собой фундаментальную компоненту климатической системы Земли. Океан выступает одновременно регулятором концентрации CO₂ в атмосфере и резервуаром углерода, хранящим его на протяжении тысячелетий. Глубокое понимание процессов растворения, биологического поглощения, перемещения и реминерализации углерода позволяет оценить устойчивость океанических экосистем и предсказать последствия изменения климата.

Комплексное изучение океанического углеродного цикла является обязательным условием для разработки глобальных климатических стратегий и сохранения экологического равновесия планеты.

Литература

1. Романкевич Е. А., Виноградов М. Е. Биогеохимия океана. — М.: Наука, 2010.
2. Лисицын А. П. Геохимические процессы в Мировом океане. — М.: Научный мир, 2017.
3. Леонов А. В. Океанология: методы исследования. — СПб.: РГГМУ, 2020.
4. Морозова Н. П. Химия морской воды. — Владивосток: ДВО РАН, 2018.
5. Соловьев В. А. Мировой океан и климат. — М.: ГЕОС, 2021.