



ИЗУЧЕНИЕ ПОДВОДНЫХ ВУЛКАНОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ВОДЫ

Морозов Андрей Геннадьевич

Ведущий научный сотрудник, Кафедра гидрогеологии и инженерной геологии,
Санкт-Петербургский государственный университет СПбГУ
г. Санкт-Петербург, Россия

Калинина Елена Николаевна

Ведущий научный сотрудник, Лаборатория морской геохимии, Институт
океанологии имени П. П. Ширшова РАН
г. Москва, Россия

Аннотация

Подводные вулканы и связанные с ними гидротермальные источники являются одними из самых динамичных и наименее изученных геологических объектов на Земле. Они играют критически важную роль в регулировании глобального химического баланса океанов, выступая в качестве мощных поставщиков тепла, растворенных газов и различных химических элементов в морскую среду. В данной работе рассматривается механизм функционирования подводных гидротермальных систем, при котором холодная морская вода проникает в земную кору, нагревается магмой и возвращается в океан, обогащенная минералами и газами. Анализируется влияние этих выбросов на химический состав океанской воды, включая изменения в концентрациях серы, железа, марганца, меди и других микроэлементов, а также их вклад в окислительно-восстановительный баланс океана. Отдельно обсуждается значение гидротермальных источников как основы уникальных хемосинтетических экосистем, не зависящих от солнечного света.

Ключевые слова: подводный вулкан, гидротермальные источники, геохимия океана, хемосинтез, морская вода, химический состав, магматические газы, сульфиды.

Введение

Вулканическая активность под толщей воды, включая подводные извержения и выделение газов и жидкостей через гидротермальные источники, является ключевым звеном в глобальном геохимическом и тепловом цикле Земли.

По оценкам ученых, более восьмидесяти процентов вулканической активности происходит под водой, главным образом вдоль срединно-океанических хребтов — границ расходящихся тектонических плит.

Эти подводные системы являются мощными, хотя и локализованными, регуляторами химического состава океана. Они постоянно вводят в морскую воду значительные количества растворенных веществ, которые высвобождаются в результате взаимодействия нагретой морской воды с базальтовыми породами океанической коры. Понимание масштабов и механизмов этого обмена имеет фундаментальное значение для климатологии, поскольку подводная вулканическая деятельность является одним из важнейших факторов, определяющих температуру и химический состав океана, который, в свою очередь, регулирует атмосферный состав и климат.

Механизм Гидротермальной Циркуляции

Гидротермальные источники функционируют за счет сложной системы циркуляции воды внутри океанической коры.

Инфильтрация и нагрев. Холодная морская вода проникает в океаническую кору через трещины и поры, часто на расстоянии до нескольких километров от вулканического центра. По мере того как вода продвигается вглубь коры, она подвергается постепенному нагреву за счет близости к магматическим очагам. Температура воды может достигать четырехсот градусов Цельсия и более, при этом вода остается в жидком состоянии благодаря высокому давлению на глубине.

Химические реакции. Под воздействием высоких температур и давления горячая вода становится высокореактивным растворителем. Она активно вступает в химическое взаимодействие с окружающими породами, вымывая из них такие металлы, как железо, медь, цинк и марганец, и обогащаясь газами, включая сероводород и метан. Одновременно, в процессе этого взаимодействия, из воды удаляются некоторые элементы, которые содержались в морской воде изначально, например, магний и сульфаты.

Возврат в океан. Перегретая, химически измененная вода, будучи менее плотной, чем окружающая по дна вода, поднимается и выбрасывается обратно в океан через гидротермальные жерла. В момент выхода в холодную океаническую воду происходит резкое падение температуры, что приводит к преципитации — осаждению растворенных сульфидов металлов, формируя характерные для этих мест черные курильщики или белые курильщики.

Влияние на Химический Состав Океанической Воды

Вклад гидротермальных систем в химический состав океана является огромным, особенно в отношении микроэлементов и газов.

Введение металлов. Гидротермальные источники являются основным источником поступления растворенного железа и марганца в глубоководный океан. Железо является критически важным микроэлементом для фитопланктона, особенно в районах с низким содержанием питательных веществ, поэтому выбросы из вулканов могут стимулировать локальную биологическую продуктивность. Высокие концентрации других металлов, таких как медь и цинк, также имеют локальное, а иногда и глобальное значение для океанической геохимии.

Выбросы газов. Гидротермальные системы выделяют значительные объемы растворенных газов, включая метан и сероводород. Метан является важным источником энергии для хемосинтетических организмов и может влиять на глобальный углеродный цикл. Сероводород, реагируя с кислородом, вносит вклад в окислительно-восстановительный баланс океана.

Удаление элементов. В процессе циркуляции морская вода теряет ионы магния и сульфаты, которые осаждаются в результате реакций с базальтами. Этот процесс является одним из основных механизмов, который препятствует бесконечному накоплению этих элементов в океане и поддерживает его химическую стабильность на протяжении геологического времени.

Хемосинтетические Экосистемы

Подводные вулканы создали уникальные условия для существования жизни, полностью независимой от солнечной энергии.

Механизм хемосинтеза. В отличие от фотосинтетических экосистем, основанных на солнечном свете, глубоководные сообщества вокруг гидротермальных источников используют энергию, получаемую в результате окисления восстановленных химических соединений, таких как сероводород и метан, которые поступают из жерл. Этот процесс называется хемосинтезом. Хемосинтезирующие бактерии и археи являются основой этих пищевых цепей, выступая в роли первичных продуцентов.

Уникальные сообщества. Жизнь вокруг этих источников изобилует эндемичными видами, которые приспособились к экстремальным условиям высокой температуры, давления и токсичных концентраций металлов. Среди них — гигантские вестиментиферы — трубчатые черви, живущие в симбиозе с хемосинтезирующими бактериями, и уникальные виды креветок и моллюсков. Эти экосистемы демонстрируют поразительную устойчивость и являются примером того, как жизнь может процветать в самых суровых уголках планеты.

Вклад в биогеохимические циклы. Хемосинтетические бактерии активно участвуют в круговороте серы и углерода в глубоком океане, превращая поступающие из недр Земли вещества в органические соединения. Это свидетельствует о том, что подводная вулканическая активность влияет не только на абиотическую геохимию, но и на глубоководную биогеохимию.

Изучение и Мониторинг

Исследование подводных вулканов и гидротермальных систем требует использования передовых технологий и комплексного подхода.

Автономные подводные аппараты. Большинство исследований проводится с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов и глубоководных обитаемых аппаратов. Эти устройства позволяют визуализировать жерла, собирать образцы горячей воды и отложений, а также отбирать биологические пробы в условиях высокого давления и температуры.

Дистанционное зондирование. С помощью гидроакустических методов и дистанционного зондирования океанографы картируют расположение гидротермальных плюмов — шлейфов горячей воды и частиц, поднимающихся от жерл. Эти плюмы могут распространяться на сотни километров, что позволяет оценить общий вклад источников в океаническую геохимию.

Долгосрочный мониторинг. Для понимания динамики извержений и долговременных изменений химического состава необходим долгосрочный мониторинг. Установка стационарных датчиков вблизи активных жерл позволяет непрерывно измерять температуру, pH, концентрацию сероводорода и других ключевых химических параметров.

Заключение

Подводные вулканы и гидротермальные системы являются неотъемлемой частью планетарной системы, оказывая мощное и многогранное влияние на химический состав Мирового океана. Они выступают в качестве природных геохимических реакторов, постоянно обогащая воду микроэлементами, такими как железо и марганец, и газами, регулируя при этом глобальный баланс магния и сульфатов. Эти же источники энергии поддерживают уникальные хемосинтетические экосистемы, процветающие в условиях полной темноты. Дальнейшие исследования, опирающиеся на передовые технологии глубоководного зондирования, необходимы для точной количественной оценки их вклада в глобальные биогеохимические циклы и для понимания долгосрочных последствий этих процессов для климата и жизни на Земле.

Литература

1. Морозов А. Г. Гидротермальные системы срединно-океанических хребтов. – М.: Геоинформцентр, 2024. – 410 с.
2. Калинина Е. Н. Химический состав плюмов черных курильщиков в Тихом океане. // Геохимия океана. – 2025. – Т. 16, № 2. – С. 55–69.
3. Лисицын А. П. Гидротермальные образования Мирового океана. – СПб: Наука, 2019. – 380 с.

4. Von Damm K. L. Controls on the chemistry and temporal variability of vent fluids from the East Pacific Rise. // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* – 1995. – Vol. 23. – P. 317–361.
5. German C. R., Von Damm K. L. Hydrothermal processes and the geochemistry of the oceans. // *Treatise on Geochemistry.* – 2003. – P. 181–227.