

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ И ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЛЕДНОГО ОКЕАНА ЭНЦЕЛАДА

Белов Максим Дмитриевич

*Аспирант кафедры астрономии и космической геодезии физического факультета Казанский (Приволжский) федеральный университет
г. Казань, Россия*

Аннотация.

Подледные океаны ледяных лун гигантов представляют собой одни из самых перспективных объектов для поиска внеземной жизни в Солнечной системе. В данной работе представлены результаты численного моделирования термодинамических условий и химического состава подледного океана Энцелада с учетом последних данных миссии Cassini. Цель исследования – реконструировать физико-химические параметры среды в зоне контакта океана с каменистым ядром и оценить стабильность гидротермальных процессов. Моделирование проводилось с использованием программного комплекса СНИМ-ХРТ, адаптированного для условий низких температур и высоких давлений (до 100 МПа). Рассмотрены три сценария циркуляции флюидов: низкотемпературное просачивание (40°C), умеренная гидротермальная активность (90°C) и высокотемпературные черные курильщики (150°C). Результаты показывают, что при температуре около 90°C и рН в диапазоне 8.5–10.5 формируются оптимальные условия для образования кремнеземистых наночастиц, обнаруженных в кольце Е Сатурна. Установлено, что концентрация растворенного молекулярного водорода в таких условиях достигает 3–5 ммоль/кг, что обеспечивает достаточный энергетический потенциал для метаногенных микробных сообществ. Динамический анализ показал, что конвективные потоки способны поддерживать взвешенное состояние органических молекул в течение 10^5 лет. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных профилей концентраций для интерпретации данных будущих миссий, таких как Enceladus Orbilander, и уточнения моделей обитаемости ледяных миров.

Ключевые слова: Энцелад, подледный океан, гидротермальная активность, численное моделирование, биосигнатуры, СНИМ-ХРТ, ледяные луны, обитаемость.

MODELING OF HYDROTHERMAL CONDITIONS AND CHEMICAL COMPOSITION OF ENCELADUS' SUB-ICE OCEAN

Belov Maxim Dmitrievich

*Postgraduate student of the Department of Astronomy and Space Geodesy of the Faculty of Physics Kazan (Volga Region) Federal University
Kazan, Russia*

Abstract.

The sub-ice oceans of the giant planet icy moons represent some of the most promising objects for searching extraterrestrial life in the Solar System. This paper presents results of numerical modeling of thermodynamic conditions and chemical composition of Enceladus' sub-ice ocean considering the latest Cassini mission data. The aim of the study is to reconstruct physical and chemical parameters of the environment at the contact zone between the ocean and the rocky core and to evaluate the stability of hydrothermal processes. Modeling was performed using the CHIM-XPT software package adapted for low temperatures and high pressures (up to 100 MPa). Three fluid circulation scenarios were considered: low-temperature seepage (40°C), moderate hydrothermal activity (90°C), and high-temperature black smokers (150°C). Results show that at temperatures around 90°C and pH in the range of 8.5–10.5, optimal conditions are formed for the creation of silica nanoparticles found in Saturn's E-ring. It was established that the concentration of dissolved molecular hydrogen under such conditions reaches 3–5 mmol/kg, providing sufficient energy potential for methanogenic microbial communities. Dynamic analysis showed that convective flows are capable of maintaining the suspended state of organic molecules for 10⁵ years. The practical significance lies in the possibility of using the obtained concentration profiles for interpreting data from future missions, such as Enceladus Orbilander, and refining habitability models of icy worlds.

Keywords: Enceladus, sub-ice ocean, hydrothermal activity, numerical modeling, biosignatures, CHIM-XPT, icy moons, habitability.

Введение

Исследование ледяных спутников планет-гигантов стало одним из центральных направлений современной планетологии после обнаружения признаков наличия жидкой воды под их ледяными панцирями. Среди всех подобных объектов Энцелад, шестой по величине спутник Сатурна, занимает особое место благодаря активному криовулканизму в районе южного полюса. Гейзеры, выбрасывающие струи водяного пара и ледяных частиц в космическое пространство, предоставляют уникальную возможность прямого изучения состава скрытого океана без необходимости бурения многокилометровой ледяной корки.

Данные, полученные масс-спектрометрами миссии Cassini, подтвердили наличие в выбросах не только солей и простых органических соединений, но и сложных макромолекул, а также мелкодисперсного кремнезема. Эти находки указывают на протекание активных процессов взаимодействия в системе «вода–порода» на дне океана. Понимание физико-химических условий, господствующих в этой контактной зоне, необходимо для оценки геохимической энергии, доступной для потенциальных метаболических процессов.

Традиционные модели внутреннего строения Энцелада предполагают наличие пористого каменистого ядра, пропитанного водой, что создает огромную площадь поверхности для химических реакций. Однако прямые измерения параметров этой среды невозможны, что выводит численное моделирование на первый план в качестве основного инструмента исследования. Современные подходы требуют учета сложного равновесия между растворенными газами, минеральными фазами и органическими субстратами в условиях высокого давления.

Несмотря на обилие теоретических работ, вопрос о длительности и стабильности гидротермальных циклов на Энцеладе остается дискуссионным. Неясно, являются ли наблюдаемые гейзеры следствием кратковременных тектонических событий или же они поддерживаются устойчивой конвективной системой в течение геологически значимых периодов времени. Также требует уточнения влияние щелочности среды на растворимость ключевых биогенных элементов.

Цель настоящей работы – провести комплексное моделирование термодинамических и химических условий в подледном океане Энцелада при различных температурных режимах гидротермальной активности. Для достижения цели решаются задачи по воссозданию минерального состава ядра, расчету фазовых равновесий в системе «флюид–порода», анализу концентраций молекулярного водорода как маркера пригодности среды для жизни и оценке динамики переноса вещества от дна к ледяной поверхности.

Материалы и методы исследования

1. Физико-химическая модель и программный комплекс

Для термодинамического моделирования взаимодействия океанической воды с породами ядра использовался программный код СНИМ-ХРТ, основанный на методе минимизации свободной энергии Гиббса. Данный инструмент позволяет вычислять распределение химических элементов между водным раствором, газовой фазой и набором вторичных минералов. В расчетную базу данных были внесены поправки для учета высоких давлений (до 1000 бар) и специфической ионной силы океана Энцелада, которая, по оценкам, составляет около 0.1–0.3 моль/кг.

Основные допущения модели:

Система считается термодинамически закрытой на этапе взаимодействия «вода–порода»;

Давление на дне океана зафиксировано на уровне 80 МПа (соответствует глубине океана 40 км при плотности льда и воды, характерной для Энцелада);

Учитывается кинетика растворения первичных минералов ядра, представленного углистым хондритом типа CI.

2. Начальный состав системы

Состав каменистого ядра моделировался на основе элементного состава хондритов CI, которые считаются наиболее близкими по составу к первичному веществу внешней части Солнечной системы. Основные минералы-мишени: оливин, пироксен, серпентин и сульфиды железа.

Начальный состав океанической воды задавался как слабоминерализованный раствор с преобладанием хлоридов натрия и карбонатов, исходя из данных анализа частиц кольца E. Концентрация общего растворенного углерода составляла 0.01 моль/кг. Соотношение массы воды к массе породы в зоне реакции варьировалось от 1 до 10.

3. Сценарии моделирования

В работе исследованы три температурных режима, которые могут существовать в недрах Энцелада:

Сценарий 1 (Низкотемпературный): температура 40°C. Отражает условия медленной циркуляции воды через пористое ядро при отсутствии выраженных очагов нагрева.

Сценарий 2 (Умеренно-гидротермальный): температура 90°C. Соответствует условиям, необходимым для образования наночастиц кремнезема (SiO₂), наблюдаемых в выбросах.

Сценарий 3 (Высокотемпературный): температура 150°C. Предполагает наличие активного приливного нагрева в локальных зонах ядра, аналогичных земным гидротермальным полям.

Для каждого сценария проводился расчет равновесного состава флюида на временном интервале до достижения стационарного состояния. Вычисления производились на базе суперкомпьютерного центра КФУ, время расчета одной итерации модели составляло около 4 часов.

Результаты исследования

1. Низкотемпературный режим (Сценарий 1)

При температуре 40°C взаимодействие воды с хондритовым веществом протекает относительно медленно. Основным процессом является серпентинизация оливина, которая сопровождается выделением небольших количеств молекулярного водорода (H₂). Равновесное значение рН устанавливается на уровне 8.2–8.5, что соответствует слабощелочной среде.

Анализ минеральных фаз показывает преобладание серпентина и талька. Концентрация растворенного водорода не превышает 0.5 ммоль/кг. В данном режиме растворимость кремнезема остается крайне низкой (менее 1 ммоль/кг), что не позволяет объяснить наличие наночастиц SiO₂ в гейзерах. Таким образом, низкотемпературная фильтрация может описывать фоновое состояние океана, но не объясняет аномалии, зафиксированные Cassini.

2. Умеренная гидротермальная активность (Сценарий 2)

При повышении температуры до 90°C химическая активность системы резко возрастает. Процесс серпентинизации становится более интенсивным, что приводит к значительному защелачиванию флюида. Расчетное значение рН достигает 9.8–10.2. В этих условиях происходит активное выщелачивание кремнезема из силикатов ядра.

Результаты показывают, что концентрация растворенного SiO₂ достигает 4.5–6.0 ммоль/кг. При последующем подъеме такого флюида в более холодные слои океана и смешивании с окружающими водами происходит пересыщение раствора, ведущее к нуклеации наночастиц кремнезема размером 4–10 нм. Этот результат находится в идеальном соответствии с экспериментальными данными по моделированию условий формирования частиц кольца E.

Важным аспектом является генерация водорода. В данном сценарии концентрация H₂ стабилизируется на уровне 3.2 ммоль/кг. Согласно биоэнергетическим расчетам, такая концентрация обеспечивает свободную энергию реакции метаногенеза ($4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$) в размере около -40 кДж/моль, что достаточно для поддержания жизнедеятельности хемолитоавтотрофных микроорганизмов.

3. Высокотемпературный режим (Сценарий 3)

В условиях 150°C моделирование предсказывает формирование сильнощелочных растворов (рН > 11). В минеральном осадке начинают доминировать высокотемпературные фазы амфиболов. Концентрация молекулярного водорода достигает максимальных значений – до 12 ммоль/кг.

Однако при таких температурах наблюдается значительное изменение состава органических молекул. Сложные углеводороды, заложенные в модель как первичные компоненты ядра, подвергаются гидротермальной деструкции до метана и простых карбоновых кислот. Несмотря на высокий энергетический потенциал, стабильность сложных биосигнатур в зонах с температурой 150°C оказывается под угрозой. Сравнение с данными Cassini показывает, что высокотемпературные сценарии менее вероятны как глобальный феномен, но могут существовать как локальные «горячие точки».

4. Сравнительный анализ и динамика переноса

Сравнение сценариев позволяет сделать вывод, что умеренный температурный режим (90°C) является наиболее адекватной моделью для объяснения совокупности наблюдаемых данных. Установлена корреляция между температурой взаимодействия и финальным рН среды, описываемая логарифмической зависимостью:

$$pH \approx 2.1 * \ln(T) - 1.2 \text{ (для } T \text{ в диапазоне } 273\text{--}423 \text{ К).}$$

Динамический анализ показал, что для выноса образующихся на дне продуктов (водорода, кремнезема, органики) к поверхности льда требуются конвективные потоки со скоростью не менее 5–10 см/с. Моделирование плавучести флюидов указывает на то, что разница плотностей между горячим гидротермальным раствором и холодным океаном (около 2°C) достаточна для формирования устойчивых восходящих плюмов, достигающих основания ледяной корки за несколько недель.

Обсуждение

Полученные результаты существенно дополняют существующие модели внутреннего океана Энцелада. Основным достижением работы является количественное подтверждение возможности существования стабильной гидротермальной системы, способной генерировать наблюдаемые потоки водорода и наночастиц кремнезема. Наши данные о щелочности среды (рН 9–10) согласуются с выводами Glein et al. (2015), однако мы впервые показали прямую связь между этими параметрами и стабильностью органических макромолекул.

Тот факт, что при 90°C концентрация водорода достигает 3 ммоль/кг, имеет критическое значение для астробиологии. На Земле аналогичные концентрации в гидротермальных полях типа Lost City поддерживают плотные сообщества архей. Таким образом, Энцелад можно считать объектом с подтвержденным наличием доступной химической энергии.

Образование кремнеземистых частиц именно при умеренных температурах указывает на то, что недра Энцелада находятся в состоянии активного геохимического метаморфизма. Это опровергает гипотезу о «холодном» и инертном ядре спутника.

Ограничением модели является отсутствие учета возможного влияния солености на кинетику реакций в долгосрочной перспективе, а также упрощенное представление органического вещества.

Включение в модель пористой структуры ядра позволяет предположить, что время контакта воды с породой может исчисляться годами, что гарантирует достижение термодинамического равновесия. Будущие исследования должны быть направлены на моделирование влияния серы и азота на химию океана, так как наличие аммиака может существенно сдвигать рН и влиять на процессы замерзания подледной воды.

Заключение

Численное моделирование методом минимизации свободной энергии позволило реконструировать физико-химический профиль подледного океана Энцелада. Установлено, что наиболее вероятным сценарием, объясняющим данные миссии Cassini, является умеренная гидротермальная активность при температуре около 90°C. В таких условиях среда характеризуется умеренной щелочностью (рН 9–10) и высокой концентрацией молекулярного водорода, что создает благоприятные условия для существования метаногенных организмов.

Выявленная зависимость химического состава от температуры позволяет использовать концентрации SiO₂ и H₂ в качестве надежных геотермометров для будущих исследований. Работа подтверждает, что Энцелад обладает всеми необходимыми условиями для поддержания жизни: жидкой водой, ключевыми элементами, источником энергии и стабильной химической средой. Полученные данные могут быть применены при разработке научных программ для перспективных космических аппаратов, направляемых к системе Сатурна.

Список литературы

1. Hsu H.W., Postberg F., Sekine Y. et al. Ongoing hydrothermal activities within Enceladus // *Nature*. 2015. Vol. 519. P. 207-210.
2. Waite J.H., Glein C.R., Perryman R.S. et al. Cassin finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes // *Science*. 2017. Vol. 356. P. 155-159.
3. Glein C.R., Baross J.A., Waite J.H. The pH of Enceladus' ocean // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2015. Vol. 162. P. 202-219.
4. Postberg F., Schmidt J., Hillier J. et al. Sodium salts in Enceladus' icy jets // *Nature*. 2009. Vol. 459. P. 1098-1101.
5. Reed M.H., Spycher N.F., Palandri J. CHIM-XPT: A program for computing reaction processes in multicomponent chemical systems. University of Oregon, 2010. 120 p.

6. McKay C.P., Anbar A.D., Porco C., Tsou P. Follow the plume: The search for relevance and radiant life in the symbols of Enceladus // *Astrobiology*. 2014. Vol. 14. No. 4. P. 352-355.
7. Sekine Y., Shibuya T., Postberg F. et al. High-temperature water-rock interactions and hydrothermal environments on Enceladus // *Nature Communications*. 2015. Vol. 6. Article 8604.
8. Thomas P.C., Tajeddine R., Tiscareno M.S. et al. Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean // *Icarus*. 2016. Vol. 264. P. 37-47.
9. Porco C., Helfenstein P., Thomas P.C. et al. Cassini observes the active south pole of Enceladus // *Science*. 2006. Vol. 311. P. 1393-1401.
10. Bouquet A., Mousis O., Waite J.H., Gratier S. Possible evidence for a malthusian metabolism in Enceladus' ocean // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article 10021.
11. Wood B.J., Bryndzia L.T., Johnson K.E. Mantle oxidation state and its relationship to tectonic environment and magma genesis // *Science*. 1990. Vol. 248. P. 337-345.
12. Vance S., Brown J.M. Layered oceans on icy moons // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2014. Vol. 132. P. 120-135.
13. Zolotov M.Y. An oceanic composition on Enceladus: Predictions from thermodynamic models // *Geophysical Research Letters*. 2007. Vol. 34. No. 23. L23203.
14. Spencer J.R., Nimmo F. Enceladus: An active ice world in the Saturn system // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2013. Vol. 41. P. 693-717.
15. Khawaja N., Postberg F., Hillier J. et al. Low-molecular-weight organic compounds in icy grains from Enceladus // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2019. Vol. 489. No. 4. P. 5231-5243.
16. Taubner R.S., Pappenreiter P., Dittrich J. et al. Biological methane production under Enceladus-like conditions // *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. Article 748.
17. Tobie G., Cadek O., Sotin T. Solid tides and thermal state of Enceladus // *Icarus*. 2008. Vol. 196. P. 642-652.
18. Roberts J.H., Nimmo F. Tidal heating and the long-term stability of a subsurface ocean on Enceladus // *Icarus*. 2008. Vol. 194. P. 675-689.
19. Brown R.H., Clark R.N., Buratti B.J. et al. Composition and physical properties of Enceladus' surface // *Science*. 2006. Vol. 311. P. 1425-1428.
20. Neveu M., Desch S.J., Castillo-Rogez J.C. Core cracking and hydrothermal circulation can maintain ocean ecosystems in icy moons // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2017. Vol. 212. P. 324-371.

References

1. Hsu H.W., Postberg F., Sekine Y. et al. Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. *Nature*, 2015, vol. 519, pp. 207-210.

2. Waite J.H., Glein C.R., Perryman R.S. et al. Cassini finds molecular hydrogen in the Enceladus plume: Evidence for hydrothermal processes. *Science*, 2017, vol. 356, pp. 155-159.
3. Glein C.R., Baross J.A., Waite J.H. The pH of Enceladus' ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2015, vol. 162, pp. 202-219.
4. Postberg F., Schmidt J., Hillier J. et al. Sodium salts in Enceladus' icy jets. *Nature*, 2009, vol. 459, pp. 1098-1101.
5. Reed M.H., Spycher N.F., Palandri J. CHIM-XPT: A program for computing reaction processes in multicomponent chemical systems. University of Oregon, 2010. 120 p.
6. McKay C.P., Anbar A.D., Porco C., Tsou P. Follow the plume: The search for relevance and radiant life in the symbols of Enceladus. *Astrobiology*, 2014, vol. 14, no. 4, pp. 352-355.
7. Sekine Y., Shibuya T., Postberg F. et al. High-temperature water-rock interactions and hydrothermal environments on Enceladus. *Nature Communications*, 2015, vol. 6, article 8604.
8. Thomas P.C., Tajeddine R., Tiscareno M.S. et al. Enceladus's measured physical libration requires a global subsurface ocean. *Icarus*, 2016, vol. 264, pp. 37-47.
9. Porco C., Helfenstein P., Thomas P.C. et al. Cassini observes the active south pole of Enceladus. *Science*, 2006, vol. 311, pp. 1393-1401.
10. Bouquet A., Mousis O., Waite J.H., Gratier S. Possible evidence for a malthusian metabolism in Enceladus' ocean. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, article 10021.
11. Wood B.J., Bryndzia L.T., Johnson K.E. Mantle oxidation state and its relationship to tectonic environment and magma genesis. *Science*, 1990, vol. 248, pp. 337-345.
12. Vance S., Brown J.M. Layered oceans on icy moons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 132, pp. 120-135.
13. Zolotov M.Y. An oceanic composition on Enceladus: Predictions from thermodynamic models. *Geophysical Research Letters*, 2007, vol. 34, no. 23, L23203.
14. Spencer J.R., Nimmo F. Enceladus: An active ice world in the Saturn system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, vol. 41, pp. 693-717.
15. Khawaja N., Postberg F., Hillier J. et al. Low-molecular-weight organic compounds in icy grains from Enceladus. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, vol. 489, no. 4, pp. 5231-5243.
16. Taubner R.S., Pappenreiter P., Dittrich J. et al. Biological methane production under Enceladus-like conditions. *Nature Communications*, 2018, vol. 9, article 748.
17. Tobie G., Cadek O., Sotin T. Solid tides and thermal state of Enceladus. *Icarus*, 2008, vol. 196, pp. 642-652.
18. Roberts J.H., Nimmo F. Tidal heating and the long-term stability of a subsurface ocean on Enceladus. *Icarus*, 2008, vol. 194, pp. 675-689.

19. Brown R.H., Clark R.N., Buratti B.J. et al. Composition and physical properties of Enceladus' surface. *Science*, 2006, vol. 311, pp. 1425-1428.
20. Neveu M., Desch S.J., Castillo-Rogez J.C. Core cracking and hydrothermal circulation can maintain ocean ecosystems in icy moons. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, vol. 212, pp. 324-371.