

УДК 523.46-87\*2

## ОБНАРУЖЕНИЕ МИКРОБНЫХ КОМПОНЕНТОВ В ВЫПАДАЮЩИХ ОСАДКАХ ЭНЦЕЛАДА

© 2020 Д. Котларж<sup>1\*</sup>, У. Зеленкевич<sup>2</sup>, Н. Е. Залевска<sup>1</sup>, К. А. Кубяк<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт авиации, Варшава, 02-256 Польша<sup>2</sup>Институт биохимии и биофизики Польской академии наук, Варшава, 02-106 Польша

Поступила в редакцию 3 июня 2019 года; после доработки 19 января 2020 года; принята к публикации 19 января 2020 года

Благодаря наличию жидкой воды и доступной энергии Энцелад является привлекательной целью для поиска признаков жизни. В недавнем исследовании было доказано, что в выбросах гейзеров вблизи южного полюса Энцелада присутствуют водяной пар, водяной лед, углекислый газ, метан и молекулярный водород. Возможное сходство между физическими и химическими условиями на дне океана Энцелада и карбонатным минеральным раствором интенсивных подводных источников в «трубах» гидротермального поля Потерянного Города позволяет создать математическую модель процесса продвижения микробов вверх сквозь ледяную оболочку. В настоящей работе мы представляем первые результаты кинетических симуляций по методу «частица-в-клетке» для вычисления расстояний микробов в океане глубиной 10 км. Мы получили результаты для распределения микробного компонента — аналога *Methanosarcina*lessp. — характеризуемого массой 6.6 пг и диаметром 2.0 мкм в струйных выбросах вещества Энцелада. Мы предположили, что плотность теплового потока составляет  $0.1 \text{ Вт м}^{-2}$ , толщина ледяной коры — 5 км, а концентрация клеток около дна океана —  $10^5$  клеток/мл. Мы подтвердили предположение исследовательской команды Порко о концентрации клеток около поверхности океана примерно в  $10^4$  клеток/мл и многообразии вертикальной плотности струй. Мы нашли, что оптимальная высота для детектирования микробного компонента составляет менее 1.0 км и что локальные измерения, сделанные ранее масс-спектрометром Кассини и предложенные для орбитальной миссии Энцелада, возможно, неэффективны на высоте 50 км.

Ключевые слова: планеты и спутники: индивидуальные: Энцелад

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Энцелад является привлекательной средой во внешней Солнечной Системе, где жизнь может появиться и процветать благодаря жидкой воде и доступности энергии (McKay et al. 2008; Lunine et al. 2015). В последние годы были предложены, проанализированы и обсуждены концепции миссии для поиска жизни (Cable et al. 2017a;b).

Особенный интерес представляет то, что такой маленький астрономический объект, диаметром менее 500 км, термически активен. Источник этой активности до сих пор неизвестен. Рассматривается приливное нагревание от Сатурна; оно является следствием орбитального резонанса Энцелада и еще одного спутника Сатурна, Дионы. В результате этих взаимодействий ледяная поверхность Энцелада трескается и на ней формируются проломы, которые, как в случае трещин под названием «Тигровые полосы», начинают проявлять

активность при контакте с вакуумом. Теплые внутренние слои Энцелада под действием приливных процессов и радиоактивного распада прогревают внешний слой льда, что приводит к образованию «Тигровых полос», а также выделению водяного пара с кристаллами льда. В настоящий момент по причине активности Энцелада проявление криовулканизма только на южном полюсе этого спутника остается без объяснения.

Под поверхностью ледяной коры находится океан глубиной 10–50 км, являющийся источником вещества, которое выбрасывается в космос через «Тигровые полосы». Активность струй увеличивается в апоцентре орбиты Энцелада. Более точные наблюдения Кассини показали, что эти структуры удивительно схожи с океаническими хребтами на Земле. Помимо характерной «ступенчатой» структуры, наблюдалось нечто вроде зоны распространения и трансформации дефектов. Можно предположить, что «растрескивание» Энцелада связано с существованием гидротермальных расщелин, как и в случае земных разломов.

\*E-mail: Jan.Kotlarz@ilot.edu.pl

Недавние исследования доказали, что выбрасываемое в струях вещество формирует нечто вроде заслона. Похоже, что выбросы непрерывны и создают вокруг Энцелада плотный туман из мелкой ледяной пыли, которая поставляет материал для одного из колец Сатурна (кольцо E).

«Тигровые полосы» образованы 5 щелями, расположенными на расстоянии 35 км друг от друга, а толщина ледяной коры под ними составляет всего 5 км (Yip et al. 2016). Ученые предполагают, что соленый океан Энцелада (-Na, -Cl, -CO<sub>3</sub>) является щелочной средой с pH от 11 до 12 (Glein et al. 2015). Это позволяет нам сделать важные выводы о геохимических процессах внутри Энцелада. Такой высокий pH может быть следствием серпентинизации оливина. В результате серпентинизации, помимо прочих, образуются такие вещества как H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> (Sleep et al. 2004), которые считаются подходящей средой для возникновения жизни.

Глубина океана Энцелада по оценкам составляет 10–50 км (Iess et al. 2014; Davila et al. 2018). Любые микроорганизмы, живущие на его дне, должны будут преодолеть это расстояние, прежде чем начнут подниматься через линейные провалы «Тигровых полос» в южной полярной области этого спутника Сатурна. Основные параметры струй, такие как средний темп выработки льда, соотношение твердого вещества и пара, химический состав, градиент температуры, зависят от процессов под ледяной корой. Зависимость других, например, среднего геотермического потока в море района южного полюса Энцелада, pH океана, содержание соли, толщина ледяной коры и океана, от градиентов их давления и температуры все еще обсуждается.

Возможное сходство физических и химических условий на дне океана Энцелада с карбонатным минеральным раствором интенсивных подводных источников в «колонах» гидротермального поля Потерянного Города (LCHF), находящегося на 15 км западнее Срединно-Атлантического Хребта на вершине массива Атлантис на глубине примерно 750 м, дает шанс найти микробную жизнь и создать математическую модель процессов развития микробов и их подъема к поверхности через ледяную кору. Давила et al. (2018) рекомендовали включить разработку моделей формирования струй и выбросов в план будущей Астробиологической Стратегии NASA (Wright et al. 2019). Среда обитания подповерхностного океана Энцелада является объектом изучения Авиационного института Варшавы (Польша). В нашей работе представлены первые результаты кинетического («частица-в-клетке») моделирования параметров океана («мелководная» версия, около 10.0 км толщиной) и пути микробов — описанных как особый вид частиц — к поверхности океана.

Недавние исследования микробных семейств LCHF показали, что пористые внутренние стенки колонны с наиболее интенсивным подводным источником населены простейшей биопленкой, в которой на 80–90% доминирует единственный флотип порядка *Methanosarcinales*—*Methanosarcinales* Потерянного Города (Brazelton et al. 2010). Эта биопленка содержит  $2.0 \times 10^6$  и  $3.1 \times 10^8$  клеток/мл в областях, промываемых гидротермальными жидкостями (Shrenk 2017). Многочисленные *Methanosarcinales* Потерянного Города адаптировались к температуре примерно 90°C, pH 9–11 и жидкости источников с растворенным водородом (H<sub>2</sub>) и метаном (CH<sub>4</sub>) (Brazelton et al. 2010). H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> являются результатом серпентинизации. Количество CH<sub>4</sub> довольно постоянно, а доля H<sub>2</sub> меняется, вероятно, по причине биологического окисления водорода (Proskurowski et al. 2006). Физиология *Methanosarcinales* Потерянного Города неизвестна, однако анализ ряда клонов микробных семейств биопленок показал наличие генов, соответствующих процессам производства и окисления метана независимо от обилия H<sub>2</sub> (Shrenk 2017), так что эти биоценозы могут выступать как в роли потребителя H<sub>2</sub>, так и быть одновременно потребителями CH<sub>4</sub> (анаэробное окисление метана) и его источниками (Brazelton et al. 2006). Кроме того, анализ нуклеотидной последовательности гена 16S rRNA выявил штаммы, принадлежащие *Thermococcales* и некультивированной *Crenarchaeota*, обнаруженных в жидкостях источников. В самых старых колоннах (с более низкими температурами и меньшим сбросом) в порах преобладала единая группа анаэробных метанотрофных археобактерий (Brazelton et al. 2006). Редкие последовательности были обычно более изобильны в молодых колоннах, чем в более старых. Небольшое число видов также преобладает в бактериальных сообществах, в основном это метилотрофические виды (Shrenk 2017; Brazelton et al. 2010). Разнообразие и плотность микробного сообщества зависит от местоположения колонн (их внутренних и внешних стенок), где минералогия и химия жидкостей может сильно отличаться от внутренних частей колонн. Пористые внутренние стенки колонны поддерживают простейшие сообщества биопленки, а археобактерии с высокой степенью схожести с серо- и метано-окислителями гораздо более обильны в колоннах с источниками жидкости температурой вплоть до 90°C и высоким pH. Бактерии всегда были более разнообразны, чем простейшие виды во всех исследуемых выборках вне зависимости от места сбора образцов и возраста колонн (Brazelton et al. 2010).

Использованные нами в качестве микробного компонента модели *Methanosarcinales* имеют склонность в ходе деления формировать иррегулярные скопления клеток (Balch et al. 1979) разных размеров, но обычно с толстой стенкой клетки (около 0.5 мкм). В кинетических моделях мы предполагаем, что эти клетки двух диаметров (размеров): в диапазонах 0.05–1.0 мкм и 1.5–2.5 мкм, а концентрация клеток составляет около  $10^5$  клеток/мл в обоих случаях.

Наблюдались также временные вариации состава газа струи и потоков вещества от отдельных источников на Энцеладе (Saug et al. 2008). Основная компонента струи — вода в двух состояниях: твердом и парообразном. Предыдущими миссиями были также обнаружены и другие органически и биологически важные составляющие. Кассини во время своего самого близкого прохода около поверхности Энцелада в июле 2005 года собрал данные с помощью масс-спектрометра ионов и нейтральных частиц. Наилучшая оценка состава дает:  $91 \pm 3\%$   $H_2O$ ,  $3.2 \pm 0.6\%$   $CO_2$ ,  $4.0 \pm 1.0\%$   $N_2/CO$  и  $1.6 \pm 0.4\%$   $CH_4$ .  $H_2$  был также обнаружен в паре струи (Waite J. H. et al. 2007). Органические компоненты — это те, которые содержат ковалентно связанные комбинации углерода с одним или несколькими из пяти других основных элементов жизни: водорода, азота, кислорода, фосфора и серы, но следует отметить, что размер и сложность молекул не являются достаточными условиями для того, чтобы причислить их к формам жизни, так как некоторые очень большие молекулы на основе углерода являются абиотическими (Kahana et al. 2019).

Многочисленные звездные и солнечные измерения колонковой плотности пара, сделанные по ультрафиолетовым данным и данным масс-спектрометра, предполагают множественные газовые джеты с эмиссией нескольких видов: 1) высокоскоростной газ (т.е. термическое расширение газа сквозь узкие каналы, ускорение под действием давления) и 2) низкоскоростной термический (как сублимация твердого вещества или жидкости на поверхности) (Teolis и Pegg, 2017). Согласно этим данным полный выход  $H_2O$  в струе составляет от  $180 \text{ кг с}^{-1}$  до  $250 \text{ кг с}^{-1}$ . По данным масс-спектрометра ионов и нейтральных частиц (INMS), поток  $H_2O$ , наоборот, сильнее варьируется в пространстве: от  $200 \text{ кг с}^{-1}$  до  $1000 \text{ кг с}^{-1}$  (Hedman et al. 2018). Все эти данные показывают, что и структура самой струи, и структура геологической формации, откуда она берет начало, могут меняться. Обнаружение натриево-солевых зерен льда привело некоторых исследователей к выводу, что струи могут содержать в том числе и вещество океанского дна (Hsu et al. 2015).

В последние годы многие исследователи заинтересовались возможностью существования зон обитания микроорганизмов в среде с этими разнообразными условиями (Bedrossian et al. 2017; Steel et al. 2017; Porco et al. 2017).

Мы можем выделить четыре основных типа теоретически обитаемых областей около южного полюса Энцелада:

- океан в зоне вулканической активности и около нее;
- поверхность океана внутри щелеподобных формирований;
- ледяная поверхность около струйных источников куда более тяжелые частицы попадают с внутренней части подповерхностного океана и, наконец,
- сами гейзеры.

В настоящей работе мы приняли во внимание четыре процесса, связанных с теоретически обитаемыми зонами: 1) формирование суспензии микроорганизмов и свойства клеток около дна океана, 2) процесс транспортировки клеток к поверхности океана, 3) транспортировка клеток в самой струе и 4) процесс выпадения микробных частиц.

Согласно Porco et al. (2017), мы предположили наличие микробных экосистем в ультрамафических, щелочных, гидротермальных источниках на дне океана с концентрацией клеток, аналогичной LCHF, около  $10^5$  клеток/мл (Brazelton et al. 2006). Мы применили кинетическое моделирование «частица-в-клетке» для оценки концентрации и параметров клеток на поверхности океана, затем использовали кинетическую симуляцию «частица-в-клетке» для моделирования формы и плотности струи и, наконец, вычислили распределение плотности клеток в струе и в процессе выпадения. Мы применили спектральные данные четырех типов микробных штаммов для оценки возможной разности отражательной способности у разных струй, с микробной компонентой и без нее.

## 2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

### 2.1. Получение спектральных данных микробов

Для выявления спектральных признаков микробов на основе модели с параметрами *Methanosarcinales* мы использовали для измерений разные бактериальные клетки. Получение спектральных данных для отобранных концентраций микроорганизмов в диапазоне видимого света и в ближнем инфракрасном диапазоне, согласно исследованию Porco et al. (2017), было выполнено с помощью спектрометра Evolution 220 и мультиспектральной камеры QUERCUS 6, разработанной и созданной

в институте авиации в Варшаве (Zalewska et al. 2017). Мы использовали четыре чистых штамма, выделенных из пласта биопленки на факультете биохимии микробов в институте биохимии и биофизики Польской академии наук в Варшаве. Все четыре штамма отличались по форме и цвету. Для спектральных измерений была приготовлена суспензия каждого штамма клеток в дистиллированной воде в концентрации  $10^5$  клеток/мл. Все измерения отражательной способности проводились при температуре  $21^\circ\text{C}$  с помощью а) спектрометра Evolution 220 в диапазоне 500–1100 нм с частотой дискретизации 1 нм (рис. 3, внизу слева) и б) мультиспектральной камеры QUERCUS 6 с шестью оптическими фильтрами в полосах: 532 нм, 570 нм, 660 нм, 740 нм, 810 нм и 880 нм (рис. 3, внизу справа). Изображения с использованием камеры QUERCUS 6 были получены с черным фоном (коэффициент отражения меньше 5%).

### 2.2. Кинетическая модель океана

Мы разработали кинетическую модель «частица-в-клетке» шириной 10 км, глубиной 10 км и высотой 15 км с дном океана на  $z = -10$  км, нижним краем ледяного щита на  $z = 0$  км и поверхностью ледяной коры на  $z = +5$  км. В центре ледяной коры находилась щель шириной 2 км и длиной 10 км, представляющая собой один из провалов «Тигровых полос» (см. рис. 1).

Согласно Porco et al. (2017), мы предполагаем поток тепла на дне океана схожим с LCHF:  $\Phi \sim 0.1 \text{ Вт м}^{-2}$ , содержание соли около 1.0%, концентрацию микробов в гидротермальных каналах Энцелада около  $10^5$  клеток/мл. Необходимо отметить, что параметры кинетической модели соответствует нашим знаниям на текущий момент, однако известны они с большой неопределенностью.

Мы предполагаем, что на воду и на частицы микробной компоненты действуют четыре основных силы: гравитация Энцелада, подъемная сила, сопротивление воды и сила градиента давления, описываемые следующими параметрами: масса  $m$ , вектор скорости  $v$ , температура  $T$ , объем  $V$  и плотность  $\rho$ . Далее мы заменили непрерывные поля их дискретными аналогами, определенными на сетках клеток (в этой модели использовались  $100 \times 100 \times 150$  кубических клеток с длиной стороны 100 м).

Мы ввели конечное пространственное разрешение  $r \rightarrow i\Delta r$ , разрешение момента  $p \rightarrow j\Delta p$  и конечное временное разрешение  $t \rightarrow k\Delta t$ , с целыми значениями  $i$ ,  $j$  и  $k$ . Все дифференциальные уравнения потенциальных полей были заменены простыми разностями.

Мы предполагаем радиус Энцелада  $r_{\text{surface}} = 250$  км, толщину ледяного щита 5 км и глубину океана 10 км. Если внутренняя плотность

Энцелада постоянна и расстояние между центром Энцелада и дном океана  $r_{\text{bottom}} = 235$  км, ускорение силы тяжести на дне океана на 6% меньше, чем на поверхности:  $g_{\text{surface}} = 0.1108 \text{ м с}^{-2}$  и  $g_{\text{bottom}} = 0.1042 \text{ м с}^{-2}$  соответственно. Гравитационный потенциал был вычислен для каждой сетки согласно стандартному уравнению:  $U(x, y, z) = -G \frac{M}{z + r_{\text{bottom}}}$ , где  $G$  — гравитационная постоянная,  $M$  — масса Энцелада, а  $z$  — высота над нижней частью ледяного щита. Гравитационный потенциал в нашей модели не зависит от  $x$  и  $y$ . Мы предполагаем основную температуру океана постоянной (около  $0^\circ\text{C}$ ). Подъемная сила зависит от плотности частицы и объема смещенной океанской воды, согласно стандартной формуле  $B = \rho_{\text{particle}} V_{\text{displaced}}$ .

Сопротивление океана было введено согласно уравнению Гагена–Пуазейля  $\Delta P = 8\mu LQ / (\pi r^4)$  где  $\Delta P$  — разность давлений между соседними сетками клеток,  $\mu$  — динамическая вязкость воды,  $L$  — размер клетки,  $r$  — радиус частицы,  $V$  — объемный расход жидкости, вычисленный перемножением поперечного сечения частицы, ее скорости и временного шага итерации:  $V = \Delta t \pi r^2 |\vec{v}|$ . Локальное давление для каждой клетки в сетке вычислялось с помощью интеграла:  $P(d) = \int_d^{5 \text{ km}} \rho(z) [1 \text{ м}^2] g(z) dz$  где  $g$  — локальное ускорение тяжести. Так как в нашей модели давление зависит только от силы сопротивления по оси  $z$ , оно также параллельно оси  $z$ .

### 2.3. Кинетическая модель струи

Модифицированная симуляция была применена к модельной плотности струй, форме, составу, пространственному многообразию в случае теплового расширения. Для оценки скоростей и температур частиц струи мы использовали концентрацию частиц, массу и температуру поверхности океана. Масса частиц моделировалась рандомно согласно нормальному распределению со средней массой  $5 \times 10^{-6}$  мкг. Это значение вычислялось в предположении радиуса частицы водяного льда в струях 1 мкм, согласно фотометрическому поведению струи, наблюдавшемуся научной подсистемой получения изображений Кассини в 2005 году (т.е. на основе изображений от 27-го ноября) (Porco et al. 2006; Porco et al. 2017).

Мы предполагали единую силу, действующую на частицы струи, включая частицы микробной компоненты: гравитацию Энцелада. Здесь мы применили  $100 \times 100 \times 250$  клеток размерами 600 м ( $x$  и  $y$ ) и 400 м ( $z$ ).

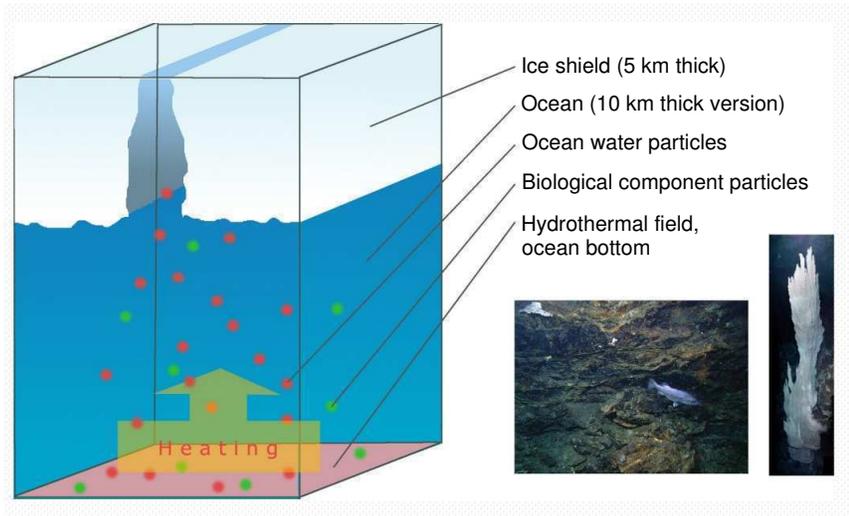


Рис. 1. Кинетическая модель «частица-в-клетке» океана Энцелада глубиной 10 км.

Скорости частиц были вычислены в предположении того, что тепловая энергия частицы океана равна кинетической энергии частицы в струе:  $9kT_{\text{Ocean}} = \frac{1}{2}mv_{\text{Plume}}^2$  где  $k$  — постоянная Больцмана. Средняя скорость одной частицы воды в струе равна  $1073.44 \pm 2.90 \text{ м с}^{-1}$ .

Мы предполагали температуру источника струи около 180 К согласно тепловым измерениям Кассини (Dong et al. 2014) и максимальную доступную кинетическую энергию, равную разности между тепловыми энергиями согласно температурам: 1) частиц микробной компоненты на поверхности океана (277.64 К) и 2) источника струи (180 К). Если эту энергию конвертировать в кинетическую, в предположении средней массы частицы 6.60 пг, то средняя скорость будет равна  $904.5 \text{ м с}^{-1}$  (85% скорости водяных частиц струи).

Мы рассматриваем четыре случая в нашем кинетическом моделировании:

6F) частицы с массой 6.60 пг и начальной скоростью  $904.5 \text{ м с}^{-1}$ ;

6S) частицы с массой 6.60 пг и начальной скоростью между 0.0 и  $904.5 \text{ м с}^{-1}$  (стандартное равномерное распределение);

1F) частицы с массой менее 1.0 пг и начальной скоростью  $904.5 \text{ м с}^{-1}$  и

1S) частицы с массой менее 1.0 пг и начальной скоростью 0.0– $904.5 \text{ м с}^{-1}$ .

Случаи 6F и 6S можно использовать как представление частиц *Methanosarcinales*. 1F и 1S были подобраны в качестве сравнения со случаем клеток гораздо меньшего размера.

#### 2.4. Спектральный анализ

Мы предположили, что вещество в струе неоднородно и средняя длина свободного пробега фотона варьируется в разных частях струи, но средняя длина свободного пробега может быть определена локально. Мы также использовали предположение о тонкости модельной атмосферы (оптическая толщина  $\tau$  мала и  $e^{-\tau} \approx 1 - \tau$  и, следовательно, интенсивность отражения может быть определена из уравнения (Kubiak M. A. 1994):

$$I_{\nu}(\tau) = I_{\nu}(0) - \tau I_{\nu}(0)$$

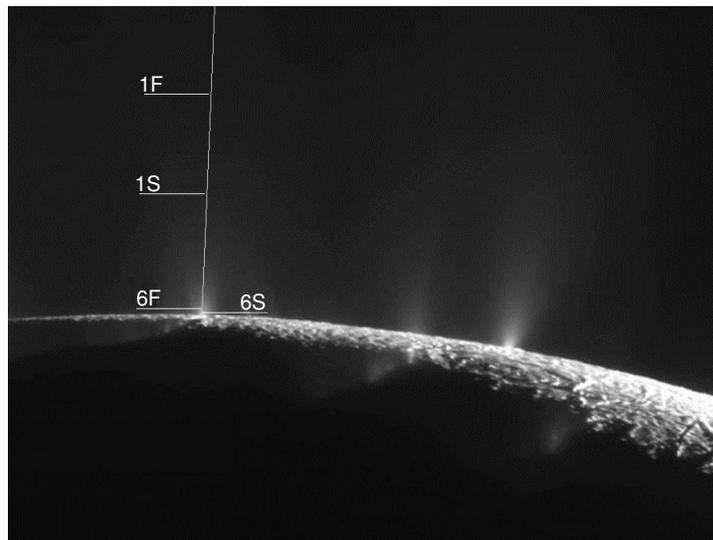
в предположении о коэффициенте излучательной способности, равном 0. Спектральная отражательная способность была оценена на следующих высотах: 1 км, 5 км, 10 км, 50 км и 80 км и сравнена с изображениями струй, полученных Кассини в полосе 635 нм (рис. 2).

Для каждой высоты мы вычислили максимальную отражающую способность  $RMAX_{\text{alt}}$  и стандартное отклонение положения частиц струи  $DX_{\text{alt}}$ . Далее мы предположили, что интенсивность отражающей способности имеет вид

$R(x, \text{alt}) = RMAX_{\text{alt}} e^{-\frac{x^2}{DX_{\text{alt}}^2}}$  Используя данные модели струи 6S, мы оценили потенциальную интенсивность отражающей способности струи с частицами *Methanosarcinales* согласно уравнению

$$R'(x, \text{alt}) = (1 + k(x)) RMAX_{\text{alt}} e^{-\frac{x^2}{DX_{\text{alt}}^2}},$$

где  $k$  вычисляется просто как доля суммарной массы частиц *Methanosarcinales* и суммарной массы частиц воды в модели на конкретной высоте и  $x$ .



**Рис. 2.** Изображение струйного выброса Энцелада, полученное 27 ноября 2005 года с помощью МАС на борту Кассини в полосе 635 нм и использованное для сравнения с результатами моделирования. Отмечены средние высоты микробной компоненты для четырех кинетических моделей (6S—модель с вариациями начальной скорости *Methanosarcinales*).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Мультиспектральные данные, полученные со спектрометром и мультиспектральной камерой, представлены на рис. 3.

Параметры микробных компонентов на дне океана, использованные в кинетических симуляциях, представлены в таблице 1.

Основные параметры частиц микробной компоненты на дне, в середине и около поверхности океана представлены в таблице 2.

Зависимости между вертикальной скоростью частиц, температурой и массой около океанского дна представлены на рис. 4. Зависимости концентрации клеток от глубины представлены на рис. 5.

Среднее положение микробных и водяных частиц в моделировании струи (включая *Methanosarcinales*—6S) представлено в таблице 3 и на рис. 6.

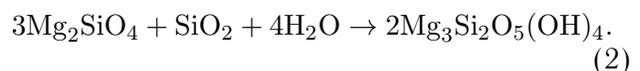
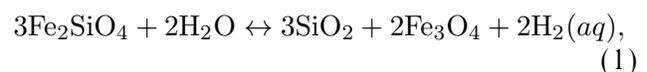
Отражающая способность струи и параметры, измеренные по изображению Кассини (рис. 2), оцененные с помощью модели струи и дополнительных факторов отражения *Methanosarcinales* для высот 1–80 км, представлены в таблице 4.

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

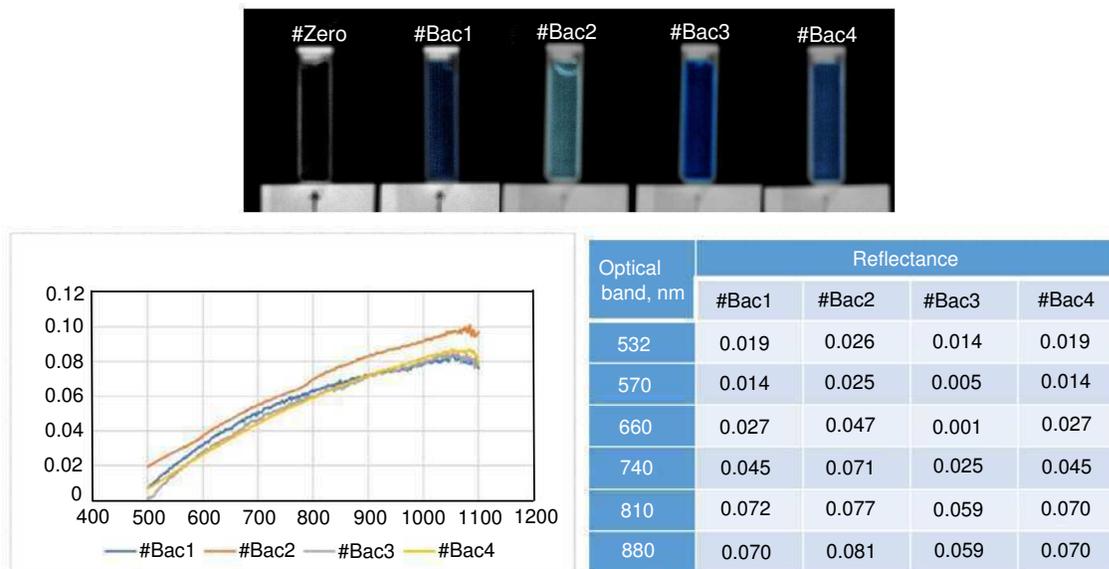
Обнаружение  $H_2$  в струе Энцелада масс-спектрометром (Waite J. N. et al. 2017) было интерпретировано как возможный источник энергии микроорганизмов, в частности, метаногенных археобактерий (Pogco et al. 2017). Однако важно отметить, что обнаружение 1) органических соединений и 2) химических соединений, вовлеченных

в возможные метаболические процессы в струях Энцелада, еще не доказывает существования микробной формы жизни. Источниками многих из этих соединений могут быть абиотические процессы, возможно, происходящие на дне океана, одинаковые для Энцелада и Гидротермального поля Потерянного города. Под гидротермальными колоннами LCHF существует глубокий магматический резервуар, который нагревает вытекающую воду, обогащенную  $H_2$  и  $CH_4$  в результате происходящей на перидотитах серпентинизации. Такая реакция и такой глубоко расположенный источник тепла генерируют относительно низкие температуры (40–90°C) и высокий pH растворов (9–11), что способствует выпадению  $CaCO_3$  и созданию карбонатных колонн в несколько десятков метров.

Серпентинная реакция — это превращение оливина в серпентин через множественные химические реакции. Оливинный кремний в процессе реакции с гидротермальной водой становится водным кремнием с водородом (уравнение 1) (Hoehler, 2005). Растворенный кремний формирует серпентин после реакции с магниевым оливином (уравнение 2) (Brindley, 1961)



Несмотря на низкое содержание  $CO_2$ , абиотический метан может производиться с помощью

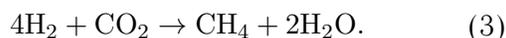


**Рис. 3.** Вверху: сравнение отражающей способности бактериальных штаммов в оптических полосах: 660 нм (красный), 720 нм («красный край») и 810 нм (близкий ИК), по данным мультиспектральной камеры QUERCUS 6, созданной в Институте Авиации (проект ЕС Life 11 ENV/PL/000459). Для наглядности отсчеты DN (0–255) домножены на фактор 28. Внизу: Спектральная отражающая способность четырех штаммов в концентрациях согласно Porco et al. (2017): по измерениям на спектрометре Evolution 220 (слева) и мультиспектральной камере QUERCUS 6 (справа).

**Таблица 1.** Начальные параметры частиц микробной компоненты

| Параметр          | Начальное значение               | Источник / Подтверждение  |
|-------------------|----------------------------------|---|
| Масса             | $6.2 \pm 2.0 \times 10^{-12}$ г  | Hildenbrand et al. (2011)   |
| Физический размер | $2.0 \pm 0.5$ мкм                | Hildenbrand et al. (2011)   |
| Температура       | 80°C                             | Brazelton et al. (2010)   |
| Местонахождение   | $0 < x, y < 10$ км<br>$z < 10$ м | —   |
| Скорость          | $0.1 \pm 0.05$ м с <sup>-1</sup> | Минимальное значение в симуляции для начальной скорости 0.1 м с <sup>-1</sup> |

водорода, сгенерированного в реакции серпентинизации, во время дегазации магматических растворов (см. уравнение 3) (Sleep, Meibom, Fridriksson, Coleman, Bird, 2004).

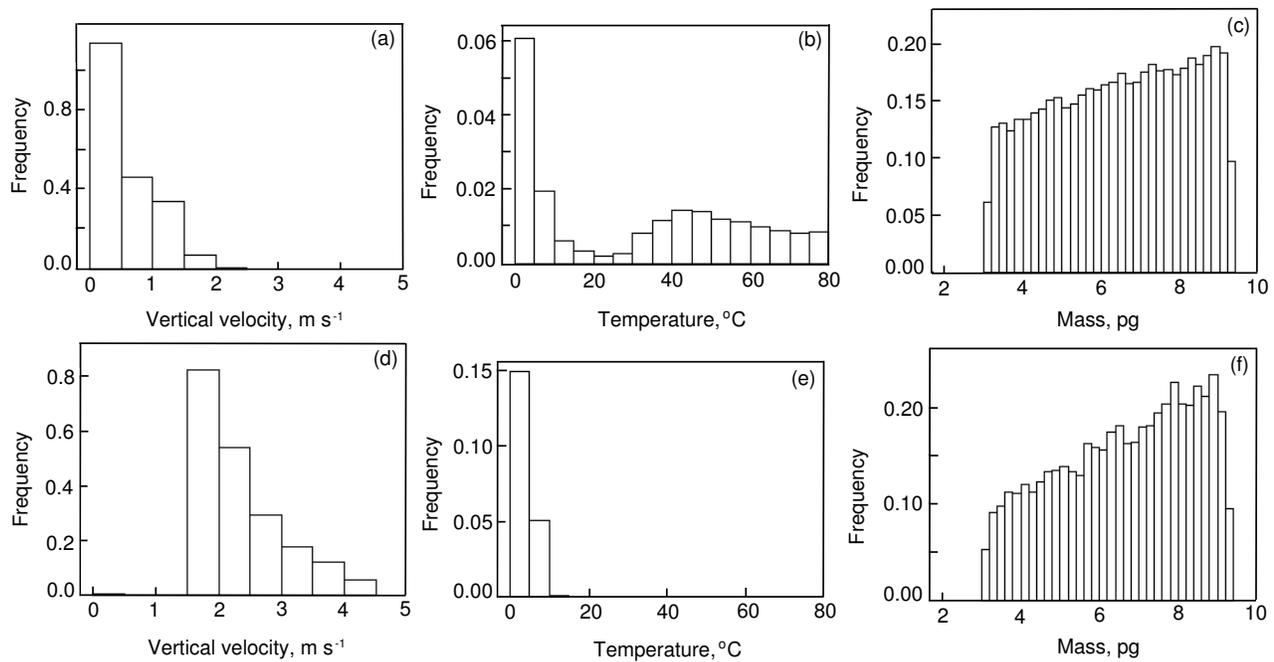


С одной стороны, органические соединения вроде метана могут иметь микробное начало, с другой, они могут быть результатом абиотических процессов, например, серпентинизации. Следует заметить, однако, что эти процессы могут поддерживать возникновение среды, схожей с «Первичным бульоном» (Kahana et al. 2019).

Концентрация клеток в жидкостях каналов LCHF была оценена как  $10^9$  клеток/мл (Steel et al. 2017) и, менее оптимистично, как  $10^5$  клеток/мл (Jakosky и Shock 1998) (Porco et al. 2017). Согласно этой меньшей концентрации, аналогичной LCHF, мы нашли, что концентрация микроорганизмов у основания ледяной коры может быть оценена в диапазоне от  $10^3$  до  $10^4$  клеток/мл. Мы также установили, что разнообразие в концентрации клеток наблюдается вплоть до нескольких километров над дном океана (3–4 км). На этом расстоянии концентрация клеток медленно меняется как примерно 200 клеток/мл на каждый километр. Мы можем принять, что в случае

**Таблица 2.** Усредненные параметры частиц микробной компоненты в различных областях океана Энцелада

| Параметр                    | Океан Энцелада       |                                  |                              |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------------|------------------------------|
|                             | Дно ( $z < -9.0$ км) | Середина ( $-5.5 < z < -4.5$ км) | Поверхность ( $z > -1.0$ км) |
| Масса, пг                   | $6.42 \pm 1.77$      | $6.57 \pm 1.74$                  | $6.60 \pm 1.74$              |
| Температура, °C             | $31.46 \pm 25.83$    | $8.96 \pm 3.47$                  | $4.49 \pm 1.50$              |
| Концентрация клеток, кл./мл | $4.37 \times 10^4$   | $9.93 \times 10^3$               | $8.93 \times 10^3$           |



**Рис. 4.** Скорость, температура и масса частиц биологической компоненты на дне океана ( $z < -9$  км) (вверху) и около поверхности ( $z > -1.0$  км) (внизу).

моделей с более глубоким океаном концентрация клеток у основания ледяной коры будет схожей (т.е.  $3 \times 10^3$  для модели океана глубиной 40 км). Эта величина параметра должна быть подтверждена в будущих работах аналогичными кинетическими симуляциями. Глубина океана Энцелада по оценкам составляет не менее 30 км (Thomas et al. 2016) и любой микроорганизм со дна океана должен будет подняться на это расстояние. Потенциальный микроорганизм, используемый в качестве модели частицы микробной компоненты, должен иметь возможность размножаться по пути подъема, характеризуем различными параметрами океана, такими как давление и температура воды. Используемые в нашей модели метаногены могут выживать в океанской воде от 4°C на поверхности океана вплоть до 80°C около гидротермальных каналов. Резюмируя: кинетические модели типа «частица-в-клетке» дают нам возможность моделировать путь микроорганизмов в океане и должны

использоваться в качестве альтернативы жидкостным гидродинамическим моделям. Наш конечный результат —  $10^4$  клеток/мл — подтвердил оценку исследовательской команды Порко для потенциальной концентрации клеток на поверхности (Pogco et al. 2017). Остаются открытыми вопросы о свойствах микробной компоненты, в частности: 1) форма, плотность и масса клеток, 2) форма микробной компоненты (одиночные клетки, фрагменты биопленки). Свойства *Methanosarcinales*, используемые в нашем исследовании, могут быть не единственно приемлемыми.

Результаты, полученные для модели струи, указывают на то, что проектируемые траектории научных пролетов орбитальной миссии Энцелада, согласно разработке концепции (Spencer 2010), с высотами около 50 км, могут быть неподходящими для сбора микробных клеток. Средняя высота *Methanosarcinales* в моделях струй: 0.50 км для модели с низкой начальной скоростью и 0.74 км для

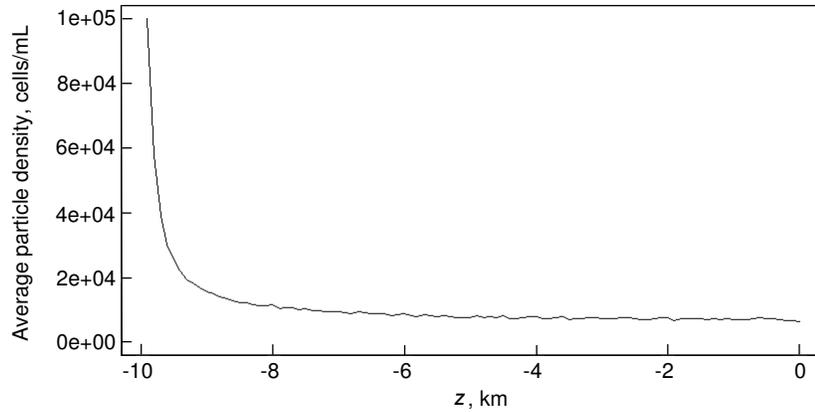


Рис. 5. Концентрация клеток в океане Энцелада.

Таблица 3. Среднее положение частиц микробной и водной компонент в струе

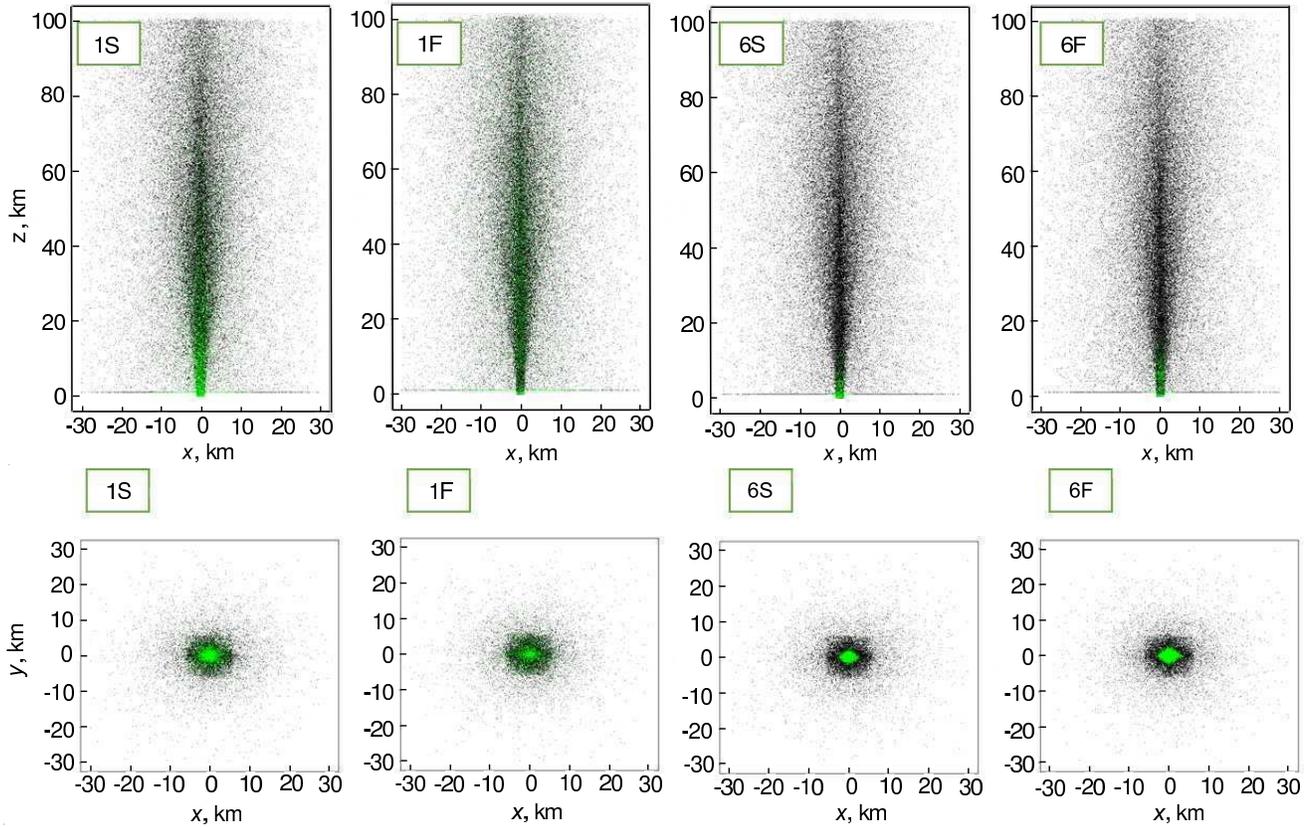
| Случай | Микробный компонент      |                          |                          | Водный компонент         |                          |                          |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|        | $\langle x \rangle$ , км | $\langle y \rangle$ , км | $\langle z \rangle$ , км | $\langle x \rangle$ , км | $\langle y \rangle$ , км | $\langle z \rangle$ , км |
| 1S     | $0.01 \pm 4.31$          | $0.01 \pm 3.93$          | $17.98 \pm 23.41$        | $0.03 \pm 6.67$          | $0.00 \pm 6.07$          | $38.13 \pm 29.89$        |
| 1F     | $0.03 \pm 6.42$          | $-0.01 \pm 5.88$         | $33.41 \pm 29.21$        | $-0.02 \pm 6.60$         | $0.02 \pm 6.03$          | $37.27 \pm 30.00$        |
| 6S     | $-0.01 \pm 0.69$         | $0.01 \pm 0.48$          | $0.50 \pm 1.08$          | $0.04 \pm 6.78$          | $0.02 \pm 6.24$          | $36.99 \pm 29.84$        |
| 6F     | $-0.01 \pm 0.86$         | $0.00 \pm 0.63$          | $0.74 \pm 1.70$          | $-0.01 \pm 6.76$         | $-0.02 \pm 6.24$         | $36.23 \pm 29.63$        |

модели с максимальной начальной скоростью, — фактически почти в 100 раз ниже, чем проектируемая высота миссии. Предложенная низкая высота в 10 км и орбитальная скорость около  $170 \text{ м с}^{-1}$  (Pogso et al. 2017) подходит только для клеток очень малых размеров (модели 1S:  $\langle z \rangle > \sim 20$  км и 1F  $\langle z \rangle \sim 30$  км). Наш результат также согласуется с ранее высказанной гипотезой о том, что должно наблюдаться варьирование размеров частиц в струях в зависимости от высоты (Hedman et al. 2009) и единственная возможность наблюдать микробную активность в виде *Methanosarcinales* может состоять в удаленных сенсорных исследованиях источников струй и их непосредственного окружения, но этот результат должен быть подтвержден будущими симуляциями с более усовершенствованной моделью теплового расширения.

Предполагая потенциальную силу источника света около 1/100 солнечного света на земной орбите, параметры чувствительности мультиспектральной камеры, согласующиеся с характеристиками среднеугловой камеры МАС на космическом аппарате Кассини и потенциальную разность отражающих способностей льда/воды и клеток около 30% согласно измерениям в нашем примере, следует ожидать изменений от нескольких (на

высоте около 80 км) до 1000 фотонов в секунду (на высоте около 5 км) на каждые 400 квадратных метров струи. Выявление этих отличий по данным спектрального анализа изображений источников струй также представляет серьезную задачу. Даже для разности отражающей способности клеток в видимом свете (менее 0.05) и ближнем инфракрасном диапазоне (более 0.10), для максимального вклада отражающей способности в диапазоне от  $10^{-7}$  до  $10^{-8}$  все стандартные мультиспектральные техники, т.е. показатели разности, используемые для раннего обнаружения цветения воды (Kubiak et al. 2016), могут быть недостаточны.

Многообещающей областью обнаружения являются окрестности источника струи, для которых в наших моделях 6S и 6F характерен феномен выпадения микробов. Среднее расстояние выпадающих микробов менее 1 км от источника струи и одновременно среднее расстояние падения частиц льда в диапазоне от 6 до 7 км, что может быть хорошим основанием сфокусироваться на данной области в удаленных сенсорных исследованиях. Из-за этой разницы расстояний выпадения концентрация клеток может быть выше, чем в предыдущих исследованиях (Kempf et al. 2010). Приблизительно 68–93% частиц струй Энцелада выпадают обратно на поверхность (Pogso et al. 2017) и наблюдения этого



**Рис. 6.** Частицы воды (черный) и органического вещества (зеленый) в струе (вверху) и в наземных отложениях в результате процесса выпадения микробов (внизу) в случае маленьких (менее 1 пг) и больших (6.6 пг) органических частиц с максимальной возможной начальной скоростью ( $904.5 \text{ м с}^{-1}$ , F) и со стандартным равномерным распределением ( $0.0\text{--}904.5 \text{ м с}^{-1}$ , S).

**Таблица 4.** Максимальная отражательная способность струи и ее горизонтальное стандартное отклонение, вычисленные по изображениям камеры MAC аппарата Кассини в полосе 635 нм и в рамках кинетической модели без микробной компоненты и с ее включением, на пяти высотах;  $\Delta R$  —разность между отражательной способностью воды и микробной компоненты. В двух крайних правых столбцах приведены примеры расчетов для штамма #Bac1 в двух оптических полосах: 660 нм (красный) и 880 нм (ближний ИК).

| Высота,<br>км | По данным Cassini MAC |                | Модель струи без микробной компоненты |                | Дополнительная микробная компонента |                |                             |                             |
|---------------|-----------------------|----------------|---------------------------------------|----------------|-------------------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
|               | <i>RMAX</i>           | <i>DX</i> , км | <i>RMAX</i>                           | <i>DX</i> , км | <i>RMAX</i> / $\Delta R$            | <i>DX</i> , км | <i>RMAX</i> (660 нм, #Bac1) | <i>RMAX</i> (880 нм, #Bac1) |
| 1             | 0.97                  | 17.72          | 0.7375                                | 7.04           | $+3.6 \times 10^{-7}$               | 3.18           | $+9.7 \times 10^{-8}$       | $+2.5 \times 10^{-7}$       |
| 5             | 1.00                  | 17.70          | 0.9583                                | 19.50          | $+2.6 \times 10^{-7}$               | 18.80          | $+7.0 \times 10^{-8}$       | $+1.8 \times 10^{-7}$       |
| 10            | > 1.00                | 18.25          | > 1.00                                | 23.99          | $+1.9 \times 10^{-7}$               | 23.41          | $+5.1 \times 10^{-8}$       | $+1.3 \times 10^{-7}$       |
| 50            | 0.35                  | 23.13          | 0.5598                                | 28.63          | $+5.8 \times 10^{-8}$               | 27.67          | $+1.6 \times 10^{-8}$       | $+1.6 \times 10^{-8}$       |
| 80            | 0.22                  | 25.07          | 0.1904                                | 29.33          | $+2.7 \times 10^{-8}$               | 27.00          | $+7.3 \times 10^{-9}$       | $+7.3 \times 10^{-9}$       |

процесса в непосредственной близости от источников струй должны быть основной задачей мультиспектральных исследований при детектировании микробной компоненты камерой, предложенной в рамках концепции орбитальной миссии Энцелада.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Концентрация микробной компоненты у источников струй Энцелада зависит от массы и плотности клеток. Модель океана глубиной в 10 км с гидротермальным полем, аналогичным LCHF в Атлантическом океане, содержанием соли около 1%, концентрацией *Methanosarcinales* примерно  $10^5$  клеток/мл около гидротермальных каналов подтвердила потенциальное существование концентрации микробов около основания ледяной коры в диапазоне от  $10^3$  до  $10^4$  клеток/мл, предсказанной в работе Rogco et al. (2017). Кинетическая модель возникновения клеток в океане позволяет нам исследовать зависимость концентрации от физических параметров клеток, таких как масса и плотность. Используя модель водяной струи «частица-в-клетке», мы нашли сильную зависимость средней высоты клеток *Methanosarcinales* в струе и их массы. Для массы 6.6 пг у нас получилось, что оптимальная область, где могут находиться микробы, не превышает 1 км по высоте и расположена близко к источникам струй (менее 1 км). Этот результат показал, что методы поиска биологической активности, предложенные для орбитальной станции Энцелада (масс-спектрометр и высота орбиты около 50 км), могут быть недостаточными для этого случая. Кроме того, при потенциальном использовании мультиспектральной камеры для этой цели следует сфокусироваться на области около источника струи, где должна быть более высокая концентрация частиц *Methanosarcinales* шириной 2 мкм и массой 6.6 пг.

Спектральные измерения четырех образцов штаммов бактерий показали разницу между отражающей способностью клеток в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Однако она слишком мала (приблизительно 0.05 при концентрации около  $10^7$  клеток/мл) для стандартного удаленного метода сенсорной регистрации микробов. По нашим оценкам ожидается всего несколько фотонов отраженного света на каждые  $400 \text{ м}^2$  на высоте 80 км и несколько тысяч на высоте 5 км (разность отражающей способности приблизительно  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  согласно параметрам накопления среднеугловой камеры Кассини МАС). Это значение может быть серьезной задачей при анализе мультиспектральных изображений, но отличие среднего расстояния, которое для падающих микробов составляет менее 1 км от источника

струи в сравнении с 6–7 км для выпадающих частиц льда и воды размером в 1 мкм, является весомой причиной, чтобы сфокусироваться в будущих удаленных сенсорных исследованиях на этой конкретной области.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке института авиации. Мы благодарим наших коллег из отдела удаленного сенсорного обнаружения за проведенные консультации, которые сильно помогли в нашем исследовании. Мы благодарим профессоров Romana Ratkiewicz и Wojciech Kopior за помощь в моделировании по методу «частица-в-клетке».

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Balch, G. Fox, L. Magrum, et al., *Microbiological Rev.* **61** (1), 81 (1979).
2. M. Bedrossian, C. Lindensmith, and J. Nadeau, *Astrobiology* **17** (9), 913 (2017).
3. W. J. Brazelton, K. A. Ludwig, M. L. Sogin, et al., *Proc. Nat. Academy Sci.* **107** (4), 1612 (2010).
4. W. J. Brazelton, M. O. Schrenk, D. S. Kelley, and J. A. Baross, *Appl. Environmental Microbiology* **72** (9), 6257 (2006).
5. G. W. Brindley, *J. Mineralogical Soc. Japan* **5** (4), 217 (1961).
6. M. L. Cable, L. J. Spilker, F. Postberg, et al., *LPI Contr.*, No. 2042, id. 4124 (2017a).
7. M. L. Cable, J. I. Lunine, L. J. Spilker, et al., *LPI Contr.*, No. 1964, id. 2577 (2017b).
8. A. Davila, C. McKay, D. Willson, et al., in *Conditions in the Subsurface Ocean of Enceladus*. White paper submitted to the Committee on an Astrobiology Science Strategy for the Search for Life in the Universe (2018).
9. Y. Dong, T. Hill, and S. Ye, *JGR Space Physics* **120** (2), 915 (2014).
10. M. M. Hedman, D. Dyingra, P. D. Nicholson, et al., *Icarus* **305**, 123 (2018).
11. M. M. Hedman, P. D. Nicholson, M. R. Showalter, et al., *Astrophys. J.* **693** (2), 1749 (2009).
12. C. Hildenbrand, T. Stock, C. Lange, et al., *J. Bacteriology* **193** (3), 734 (2011).
13. T. M. Hoehler, *Metal Ions in Biological Systems* **43**, 9 (2005).
14. H. W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine, et al., *Nature* **519** (7542), 207 (2015).
15. L. Iess, D. Stevenson, M. Parisi, et al., *Science* **344** (6179), 78 (2014).

16. B. Jakosky and E. Shock, *J. Geophys. Research* **103** (S8), 19359 (1998).
17. A. Kahana, P. Schmitt-Kopplin, and D. Lancet, *Astrobiology* **19** (10), 1263 (2019).
18. S. Kempf, U. Beckmann, and J. Schmidt, *Icarus* **206** (2), 446 (2010).
19. K. A. Kubiak, J. Kotlarz, and A. M. Mazur, *Polish J. Environmental Studies* **25** (1) (2016).
20. M. A. Kubiak, *Gwiazdy i materia międzygwiazdowa* (Naukowe PWN, Warszawa, 1994) [in Polish].
21. J. Lunine, H. Waite, F. Postberg, et al., in *Europ. Geosciences Union General Assembly Conf. Abstracts* (Vienna, 2015).
22. C. McKay, C. Porco, T. Altheide, et al., *Astrobiology* **8** (5), 909 (2008).
23. C. Porco, L. Dones, and C. Mitchell, *Astrobiology* **17** (9), 876 (2017).
24. C. Porco, P. Helfenstein, P. Thomaset, et al., *Science*, **311**, 1393 (2006).
25. G. Proskurowski, M. Lilley, D. S. Kelley, and E. Olson, *Chem. Geol.* **229**, 331 (2006).
26. J. Saur, N. Schilling, F. M. Neubauer, et al., *Geophys. Research Lett.* **35** (20), L20105 (2008).
27. O. Shrenk, in *Life in Extreme Environments*, Vol. 5: *Life at Vents and Seeps*, Ed. by J. Kallmeyer (De Gruyter, Berlin, 2017), pp. 107–138.
28. N. Sleep, A. Meibom, T. Fridriksson, et al., *Proc. Nat. Acad. Sci.* **101** (35), 12818 (2004).
29. J. Spencer, *Planetary Science Decadal Survey. Enceladus Orbiter Mission Concept Study* (United States National Research Council, Washington, 2010).
30. E. Steel, A. Davila, and C. McKay, *Astrobiology* **17** (9), 862 (2017).
31. B. Teolis and M. Perry, *Astrobiology* **17** (9), 926 (2017).
32. P. C. Thomas, R. Tajeddine, M. S. Tiscareno, et al., *Icarus* **264**, 37 (2016).
33. J. H. Waite, C. R. Glein, R. S. Perryman, et al., *Science* **356** (6334), 155 (2007).
34. S. A. Wright, B. Sherwood Lollar, S. Atreya, et al., *Amer. Astron. Soc. Meet.*, No. 233, id. 432.03 (2019).
35. N. Zalewska, J. Kotlarz, M. Kacprzak, and T. Korniluk, *Pomiary Automatyka Robotyka* **21** (2017) [in Polish].

## Microbial Component Detection in Enceladus Snowing Phenomenon

J. Kotlarz, U. Zielenkiewicz, N. E. Zalewska, and K. A. Kubiak

Enceladus is an attractive place to look for signs of life thanks to liquid water and the availability of energy. Recent research has proven that the ejected material of Enceladus south pole consists of water vapor, water ice, carbon dioxide, methane and molecular hydrogen. Possible similarities of physical and chemical conditions between Enceladus ocean bottom and the carbonate mineral matrix of actively venting chimneys of the Lost City Hydrothermal Field give an opportunity to create a mathematical model of microbial ascent process through the ice shell. In this study we present first results of particle-in-cell kinetic simulations of microbial distance through 10 km deep ocean. We have obtained results for microbial component—*Methanosarcina* sp. analogue—characterized by 6.6 pg mass and 2.0  $\mu\text{m}$  diameter distribution in Enceladus plumes. We have assumed 0.1  $\text{W m}^{-2}$  heating process, 5 km ice shell and cells concentration near ocean bottom  $10^5$  cells/ml. We have confirmed assumption of Porco research team about cells concentration near ocean surface about  $10^4$  cells/ml and vertical density diversity in plumes. We have found that the optimal altitude for microbial component detection is less than 1.0 km and that *in-situ* measurements done previously by Cassini mass spectrometer and proposed for Enceladus Orbiter mission 50 km altitude would be ineffective.

Keywords: *planets and satellites: individual: Enceladus*