

# Есть ли жизнь на Марсе?

Кандидат химических наук

**Н.И. Василевич**

Поисками жизни на Марсе астрофизики активно занимаются последние полвека. Сегодня к ним присоединились химики, которые, вполне возможно, уже нашли ответ на вопрос – есть ли жизнь на Марсе?

«Есть ли жизнь на Марсе, нет ли жизни на Марсе — это науке неизвестно. Наука еще пока не в курсе дела». Так говорил лектор Никадилов в «Карнавальная ночи» (1956 г.). Но с тех пор ситуация кардинально изменилась. Спустя девять лет американский зонд Mariner сделал первые фотографии марсианской поверхности с высоты почти 10 тысяч километров. А в последующие 53 года с Земли к Марсу было отправлено 44 миссии автоматических космических аппаратов разных стран. Из них 16 миссий — успешные, семь — частично успешные, 21 миссия потерпела неудачу. Сейчас с орбиты планеты ведут исследования шесть земных космических аппаратов. А на самой планете работают американские марсоходы Opportunity (с января 2004 года) и Curiosity (с августа 2012 года). В прошлом 2018 году к ним добавился новый исследовательский модуль InSight НАСА, успешно приземлившийся на Марсе и начавший работать.

Красная планета давно будоражит исследователей, поскольку из всех планет Солнечной системы Марс наиболее схож с Землей. В его атмосфере содержится кислород, пусть и немного. На самой планете есть вода, пусть и в твердом виде — в ледяных полярных шапках. Так что вполне логично искать жизнь на Марсе и рассматривать эту планету как наиболее подходящий вариант возможной колонизации в будущем.

К исследованию вопроса «Есть ли жизнь на Марсе?» подключились химики, решившие найти ответ в земных лабораториях. Роман Александрович Зубарев, специалист в области

медицинской протеомики и профессор отдела медицинской биохимии и биофизики Каролинского института в Швеции, уверен, что жизнь на Марсе в ее земном понимании вряд ли могла возникнуть — этому препятствует изотопный состав основных элементов жизни на Красной планете. Его сомнения опираются на модельные эксперименты с живыми системами и положения разрабатываемой им гипотезы изотопного резонанса. Но прежде чем познакомиться с результатами экспериментов и согласиться или не согласиться с выводами ученого, необходимо совершить небольшой экскурс в историю открытия изотопов и создания спектрометрии.

## Открытие стабильных изотопов

Стабильные изотопы нерадиоактивных элементов открыл в начале XX века английский физик и химик, член Лондонского королевского общества Фрэнсис Вильям Астон (Francis William Aston). В 1922 году за это открытие он был удостоен Нобелевской премии.

Двенадцатью годами раньше Фрэнсиса Астона пригласил известный физик Джозеф Джон Томпсон в знаменитую Кавендишскую лабораторию в Кембридже. В тот момент в лаборатории изучали, как ведут себя анодные лучи, то есть поток положительно заряженных ионов, под действием перпендикулярных электрического и магнитного полей. Астон включился в работу. Пучок ионов, двигаясь в электрическом поле, расщепляется на составляющие в соответствии с их зарядом. А затем, попадая в магнитное поле, перпендикулярное направлению движения, ионы начинают кружиться по окружности, радиус которой пропорционален массе частицы. Так, комбинируя электрическое и магнитное поля, можно разделять ионы, исходя из отношения их заряда к массе. Этот

*На фото сверху: это отверстие диаметром 1,6 см марсоход «Кьюриосити» просверлил для забора проб марсианского грунта 20 мая 2018 года или на 2057 день своего пребывания на Красной планете. Фото NASA*

принцип лежал в основе большинства масс-спектрометров до конца 1980-х годов. Современные же приборы используют другие принципы разделения ионов.

Астон заметил, что ионы атомов одного элемента хотя и имеют один и тот же заряд, но в магнитном поле расщепляются на несколько неравных по интенсивности составляющих. Причиной этого могло быть только существование изотопов — атомов одного и того же элемента, которые обладают разными массами. Сегодня мы знаем, что различия в массе изотопов связаны с разным числом нейтронов в их ядре. Для изучения этого явления в 1919 году Астон работал на изобретенном в 1912 году, но затем усовершенствованном масс-спектрографе с высоким разрешением, в котором легкие изотопы отклонялись намного сильнее, чем их тяжелые родственники.

Анализируя результаты своих экспериментов, Астон возродил правило целых чисел, изобретенное В. Праутом в 1815 году, но затем забытое, согласно которому массы изотопов всегда выражаются целыми числами. Этот феномен легко объясним: массы протона и нейтрона близки к одному дальтону, а масса электрона в 2000 раз меньше. Однако исследования в начале тридцатых годов на более совершенных и более точных приборах показали, что правило нуждается в корректировке. Астон измерил массу атомов более точно и обнаружил очень малые отклонения от правила целых чисел. Эти отклонения, носящие название дефекта массы, он объяснил уменьшением атомной массы в результате ее превращения в энергию связывания между частицами внутри ядра. Чем больше дефект массы, тем сильнее ядерные силы, удерживающие нуклоны, а значит, тем устойчивее ядро атома.

Астону удалось установить существование 212 стабильных природных изотопов различных элементов. Но он был не единственным открывателем изотопов. В 1929 году американские химики В. Жако и Г.Л. Джонстон (W. Giaque, H.L. Johnston) открыли стабильные изотопы кислорода с массовыми числами 18 и 19, тогда же А.С. Кинг и Р.Т. Бирге (A.S. King, R.T. Birge) опубликовали данные об углероде-13, а С.М. Науде (S.M. Naudé) — азоте-15. Дейтерий, тяжелый изотоп водорода с атомной массой 2, открыл в конце 1931 года химик Гарольд Юри (H. Urey) с коллегами из Колумбийского университета. За это открытие в 1934 году ученому была присуждена Нобелевская премия по химии.

## Тяжелая вода и живое

Через год после открытия дейтерия известный американский химик Г.Н. Льюис (G.N. Lewis) разработал способ обогащения воды дейтерием и получил 0,3 мл чистой тяжелой воды, о чем сразу же опубликовал сообщение. Теперь, когда тяжелая вода стала доступной, можно было изучать, как она влияет на живое. Вот как писал об этом Льюис в «Журнале Американского химического общества» в 1933 году: «Еще до того, как мне удалось получить тяжелую воду, я предсказывал, что она не станет поддерживать жизнь и будет смертельна для высших организмов. Как только нам удалось получить некоторое количество этого вещества, мы начали эксперименты по проверке этой идеи, для чего выбрали простой биологический эксперимент, требующий очень малых количеств воды». Льюис проращивал семена табака в запаянных стеклянных капиллярах, содержавших либо обычную, либо тяжелую воду, либо воду, обогащенную дейтерием на 50%. Семена, находившиеся в обычной воде и в 50%-ном растворе, проросли в одно и то же время, а те, которые были в тяжелой воде, не проросли совсем.

Токсичность тяжелой воды стала модной научной темой: между 1934 и 1939 годами было опубликовано 216 работ, в которых оценивалась токсичность этого вещества. Исследования проводили на головастиках, аквариумных рыбках, плоских червях и парамециях. Оказалось, что, если концентрация тяжелой воды не превышает 30%, животные могли в



ней жить и размножаться. В то же время избыток дейтерия в воде подавлял синтез белков и нуклеиновых кислот, снижал ферментную активность, нарушал механизм клеточного деления и клеточной морфологии. Чем больше была концентрация тяжелой воды, тем значительнее становились изменения. Млекопитающие оказались более чувствительными к действию тяжелой воды, причем собаки значительно чувствительнее, чем мыши.

О влиянии других стабильных изотопов на живой организм известно гораздо меньше. До 1960-х годов таких исследований почти не проводили, поскольку изотопов особо негде было взять, да и затем им уделяли значительно меньше внимания, чем исследованию дейтерия. Тем не менее в 60—70-х годах удалось выяснить, что изотопы углерода, кислорода и азота незначительно замедляют рост и скорость протекания метаболических реакций. Бактерии *E. coli* выживали и размножались в среде, на 80% обогащенной кислородом-18. Даже высшие организмы, такие как мыши, развивались в среде, содержащей 80% углерода-13, на протяжении нескольких поколений. Так что изотопы С, N и O, в отличие от дейтерия, считаются безопасными.

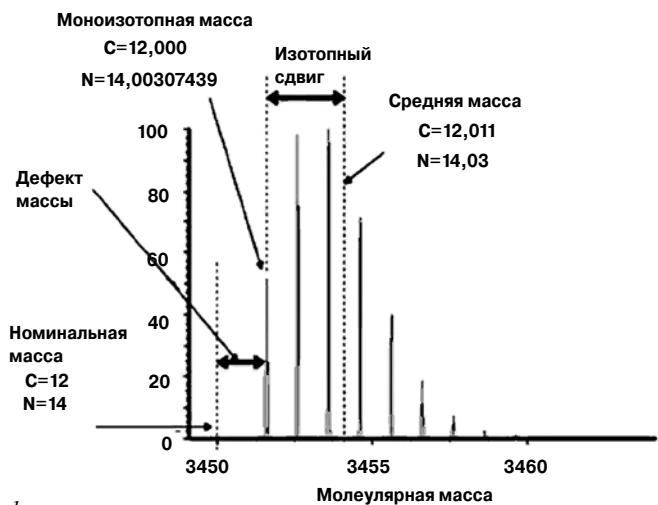
## Белки и масс-спектрометрия

Появление нового инструмента исследования — всегда событие в экспериментальной науке. Рождение масс-спектрометрии — не исключение. Этот метод оказался чрезвычайно востребованным в биохимии и прежде всего в протеомике, где часто возникает задача определить состав смеси различных белков. Белки — важнейшая составная часть любой клетки, их содержание колеблется от 8 до 14%. Совокупность всех белков клетки или ткани, или даже целого организма, называется протеомом, а область науки, его изучающая, — протеомикой.

Количество белков в одном протеоме может исчисляться тысячами, поэтому традиционные подходы, требующие выделять и очищать каждый белок, в протеомике не работают. Вот здесь и приходит на помощь масс-спектрометрия, позволяющая за одну стадию получить информацию как минимум о половине всех белков, присутствующих в протеоме.

Ключевое понятие в масс-спектрометрии — это «молекулярная масса», то есть сумма масс всех атомов, составляющих молекулу белка. У каждого белка она, разумеется, своя. Белки — это цепочки аминокислот. Большинство аминокислот состоит из четырех элементов, С, Н, N и O, некоторые содержат еще и серу. Однако у каждого из этих элементов есть несколько стабильных изотопов, поэтому молекулярная масса белка выражается не одним числом, а целым набором чисел, которое называется ее изотопным распределением. Другими словами, две молекулы, имеющие одинаковую химическую структуру, могут отличаться по своей молекулярной массе в зависимости от того, какие изотопы их составляют.

Каждая молекулярная масса отражается на масс-спектре белка в виде отдельного пика, высота которого связана с распространенностью изотопов элементов, образующих белок (рис. 1). Пик с наименьшей массой соответствует белку, обра-



1

Ключевые понятия масс-спектрометрии на примере спектра белка с общей формулой  $C_{153}H_{224}N_{42}O_{50}$

зованному самыми легкими изотопами  $^1H$ ,  $^{12}C$ ,  $^{16}O$  и  $^{14}N$ . Такую массу называют моноизотопной. Среднее арифметическое всех молекулярных масс определяемого белка с учетом их распространенности в образце называется средней молекулярной массой, а разница между средней и моноизотопной молекулярной массой носит название изотопного сдвига.

Другая важная характеристика молекулы — это величина дефекта массы, являющейся суммой дефектов масс составляющих ее атомов. Мы уже говорили, что понятие дефекта массы впервые ввел Астон, обнаруживший, что масса атома меньше, чем сумма масс образующих его нуклонов. В 1960-х годах было решено заменить кислородную шкалу ( $^{16}O = 16$ ), взять за точку отсчета изотоп углерода-12 и считать, что дефект масс этого атома равен нулю, а точная масса углерода составляет 12,000(0) дальтонов. Относительно этого изотопа каждый атом имеет положительный или отрицательный, но строго определенный дефект массы, который зависит от энергии связывания нуклонов в атоме. Дефект масс каждого элемента определяется как разница между его точной атомной массой и номинальной массой, представляющей собой сумму всех протонов и нейтронов. Дефект массы молекулы можно определить как разницу между ее моноизотопной массой и номинальной массой. Понятие дефекта массы широко используется в масс-спектрометрии.

Два параметра, дефект масс и изотопный сдвиг, имеют совершенно разные, не связанные между собой, значения. Дефект масс характеризует связь нуклонов в ядре и одинаков для всех атомов Вселенной, а изотопный сдвиг относится к распространенности изотопов на Земле. На других планетах и в других частях Вселенной изотопный сдвиг имеет совершенно другие значения. Даже на Земле эту величину можно считать постоянной только условно: она может незначительно различаться в разных регионах, а также изменяться со временем.

Все, о чем мы говорили до сих пор, — это лишь необходимая историческая преамбула к тому, о чем пойдет речь сейчас.

## Эксперимент с неожиданным результатом

В начале 2000-х годов группу ученых из МГУ и лабораторию Упсальского университета в Швеции, ведомую Р.А. Зубаревым, заинтересовали пептиды — короткие белки, которые выделяются на кожных покровах лягушек при слабой стимуляции электрическим током. Лягушка — существо с нежной кожей, но эта кожа надежно защищена невероятным количеством пептидов, которые она выделяет. Среди них обнаружены соединения с противовоспалительной, противомикробной, противогрибковой, анальгетической и противо-

раковой активностью. Спектр этих пептидов чрезвычайно велик и разнообразен, и все они интересны исследователям. А вдруг среди них скрывается потенциальное лекарство для человека? Но как разобраться в этой сложнейшей смеси?

Исследователи смыли с кожи лягушек несколько сотен пептидов, которые надо было каким-то образом разбить на группы в соответствии с их биологическими свойствами. Р.А. Зубарев предложил использовать метод двумерного картирования. Для этого были построены пузырьковые графики, где по оси X откладывали дефект массы (NMD), а по оси Y — изотопный сдвиг (NIS). Метод оказался эффективен: пептиды, относящиеся к одному и тому же семейству, оказались сгруппированными в отдельные кластеры-пузырьки.

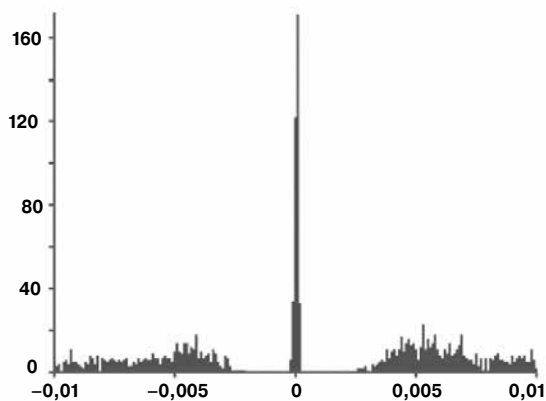
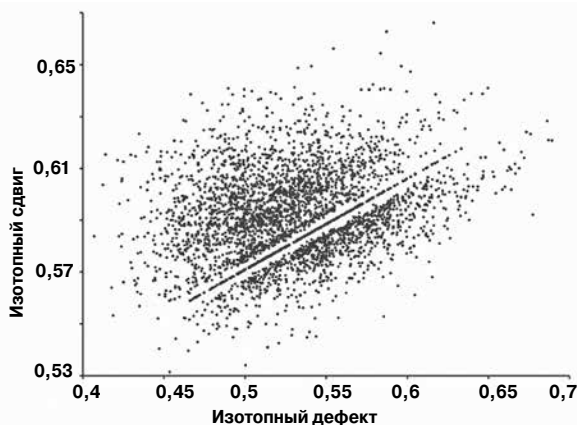
Этот же метод ученый применил при изучении пептидов, полученных из намного более сложной протеомной смеси. Она содержала уже не сотни, а тысячи (3600) пептидов, выделенных из почки мыши. Он ожидал получить более или менее гомогенное распределение точек, быть может содержащее отдельные кластеры. Однако картина его поразила: четкий коридор, куда не попала ни одна точка, с интенсивной линией посередине, рассекал, подобно ножу, все поле точек (рис. 2). Этот коридор выглядел, по словам автора, как «запрещенная зона посреди пептидной галактики с узкой линией в центре». Сначала Зубарев решил, что виной какая-то ошибка в программе обработки данных, но, повторив эксперимент несколько раз на разных протеомных смесях, он понял, что это не ошибка, а строгая закономерность.

Интересно, что подобная картина возникает только при определенном изотопном составе, например таком, какой характерен для Земли, то есть когда содержание  $^{13}C$  составляет 1,1%,  $^2H$  — 0,015%,  $^{18}O$  — 0,2%, а  $^{15}N$  — 0,37%. Если взять любое произвольное соотношение изотопов, например, такое, как на Марсе или на Венере, и отложить на графике данные для тех же самых пептидов, в подавляющем большинстве случаев мы увидим равномерно закрашенную область: никакого коридора с линией посередине не возникнет. Вместе с тем линия на рисунке математически не идеальна: она имеет конечную толщину. Сделать ее идеально тонкой можно, немного «подправив» значения распространенности тяжелых изотопов. При величинах 0,35% для  $^{13}C$  или же 0,03% для  $^2H$  линия становится математически точной, и эти значения ученый назвал резонансными. Другие резонансы возникают, если линия становится горизонтальной, как, например, при 3,5% для  $^{15}N$ .

Анализируя, какие из пептидов попали на центральную линию, Зубарев обнаружил, что это были молекулы, не содержащие серу, то есть без аминокислот метионина и цистеина. Состав этих пептидов удовлетворял простой формуле:  $H = 2C - N$ , при этом число атомов кислорода может быть любым. Этой же формуле подчиняются пептиды, содержащие остаток аланина, аспарагина, глутамина, глицина, лейцина, изолейцина, серина, треонина, валина, а также несколько аминокислот в свободной форме: аспарагиновую и глутаминовую кислоты, гистидин и пролин.

Интересно, что именно эти аминокислоты, попавшие на центральную линию, возникли на Земле первыми. Согласно оценкам многих ученых, содержание этих аминокислот на ранних стадиях зарождения жизни на Земле составляло 70–80%. Да и сегодня девять аминокислотных остатков, лежащих на центральной линии, составляют 57% от всех аминокислот, включенных в белки. Иными словами, их распространенность на 23% выше, чем остальных аминокислотных остатков.

Случайно ли такое совпадение? Р.А. Зубарев утверждает, что вряд ли. Согласно его гипотезе изотопного резонанса, жизнь в таком виде, как мы ее знаем, могла зародиться гораздо быстрее при соотношении изотопов близком к резонансному. Именно при таком соотношении изотопов кинетика всех реакций будет оптимальной, а значит, рост и развитие всех микро- и макроорганизмов будет происходить с мак-



2

Вот такой неожиданный результат — пустой коридор на поле точек — получил Р.А. Зубарев при анализе сложной протеомной смеси, содержащей 3600 пептидов. Этот хорошо воспроизводимый результат лег в основу гипотезы изотопного резонанса

симальной скоростью. Соответственно и эволюция будет быстрее. В отличие от соотношений изотопов, найденных на Марсе и Венере, а тем более в отдаленных уголках Вселенной, отклонение земных значений от резонансных невелики, поэтому жизнь зародилась на Земле, а не на этих планетах.

### «Медленная» вода и «быстрая» вода

Согласно гипотезе Зубарева, в воде, где содержание дейтерия близко к резонансному, все биохимические процессы должны протекать со скоростью, оптимальной для роста и развития организмов. Наибольшее число публикаций, описывающих влияние дейтерия на различные живые организмы, рассматривали случаи, когда достаточно большая доля  $^1\text{H}$  замещалась на дейтерий. В то же время для достижения резонанса, предсказанного теорией Зубарева, достаточно повышения содержания дейтерия в воде всего в два-три раза, от 0,015% до 0,03–0,06%.

Такое изменение концентрации в воде влечет за собой повышение концентрации дейтерия в белковых молекулах. Ведь примерно половина всех атомов водорода в белках легко обменивается на атомы водорода или дейтерия из водного раствора. Так, если белковые молекулы поместить на несколько дней в воду, содержащую 0,036% дейтерия, то содержание дейтерия в них возрастет до 0,027% (по сравнению с исходными 0,015%). Если гипотеза верна, то именно при такой концентрации должна увеличиться скорость роста организмов, в то время как вода с большим содержанием дейтерия будет подавлять их рост. Но поскольку рост и развитие организма связаны с одновременным протеканием многочисленных реакций, причем каждая обратимая реакция течет одновременно и в ту и другую сторону, часть всех биохимических реакций будет ускоряться, а часть — замедляться.

Некоторые наблюдения на сей счет были сделаны в 1930-х годах американским ученым Барнсом (Barnes) из Йельского университета. А в 1970-е годы эстафету подхватил российский ученый Валентин Лобышев из МГУ имени М.В. Ломоносова. Изучая активность фермента Na,K-АТФазы, Лобышев и его коллеги с удивлением обнаружили, что при содержании дейтерия 0,040% активность фермента вырастает в полтора раза, а при дальнейшем повышении концентрации — снова уменьшается. Эти наблюдения шли вразрез с общепринятой моделью кинетического изотопного эффекта. Согласно этой модели, увеличение массы изотопа стабилизирует образующие им химические связи, а значит, замедляет все химические реакции с участием этой связи. Поскольку легкие изотопы легче участвуют в химических реакциях, относительное содержание тяжелых стабильных изотопов увеличивается,

что приводит к прогрессивно более медленным реакциям.

Еще более удивительное с точки зрения модели кинетического изотопного эффекта подметил Зубарев: ферментативное взаимодействие люциферина и люциферазы замедлялось при концентрации дейтерия в воде 0,040% и возвращалось к нормальной скорости при 0,060%.

Таким образом, скорость ферментативных реакций при повышении концентрации дейтерия меняется не монотонно, но проходит через максимум или минимум при 0,03–0,04%, после чего возвращается к значениям, наблюдаемым при земном содержании дейтерия.

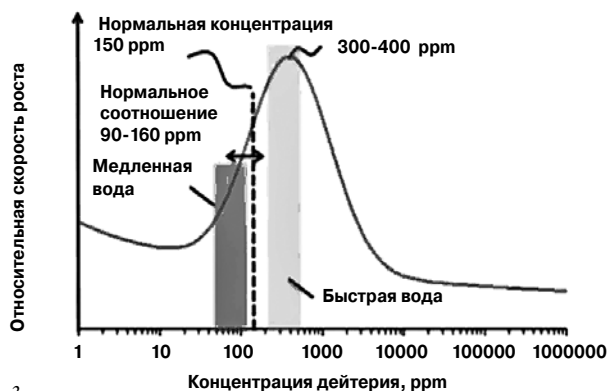
Сходные закономерности, но уже на клеточном уровне наблюдал венгерский ученый Габор Сомлай (G. Somlyai), изучая в 1993 году влияние дейтерия в воде на рост клеток. Для своих экспериментов ученый выбрал опухолевые клетки, а также фибробласты — клетки соединительной ткани, играющие важную роль в заживлении ран. Он обнаружил, что вода, обогащенная дейтерием вплоть до 0,06%, подгоняет рост обоих типов клеток, а вода с пониженным содержанием дейтерия замедляет его. Ученого заинтересовал последний эффект, и он продолжил свои работы на мышах, кошках и собаках, больных раком.

Оказалось, что вода с пониженным до 0,005% содержанием дейтерия, которую пили испытуемые, замедляла рост раковых опухолей. Исследования, проведенные в Московском научно-исследовательском онкологическом институте им. П.А. Герцена и в НИИ канцерогенеза Российского онкологического научного центра им. Н.Н. Блохина РАН подтвердили, что «легкая» вода замедляет рост различных опухолей. Оказалось, что в среде с низким содержанием дейтерия деление опухолевых клеток аденокарциномы молочных желез MCF-7 начинается с задержкой на 5–10 часов, а у 60% мышей с подавленным иммунитетом и пересаженными грудными человеческими опухолями MDA и MCF-7, которые пили «легкую» воду, происходил регресс опухоли. Сомлай предлагает использовать обедненную дейтерием воду в качестве дополнительного средства при лечении рака.

Гидроидные полипы *Obelia geniculata* тоже чувствительны к содержанию дейтерия в морской воде, в которой они обитают. Эти многоклеточные организмы известны тем, что из небольшого фрагмента тела они могут регенерировать целый организм. Лобышев выяснил, что при концентрации дейтерия в воде 0,03–0,1% происходит ускоренная регенерация, если же концентрация больше, то процесс замедляется.

Все это необъяснимо с точки зрения классических представлений, но прекрасно согласуется с зубаревской гипотезой изотопного резонанса. Когда содержание дейтерия в белковых молекулах приближается к резонансным значениям, скорость всех ферментативных реакций становится оптимальной с точки зрения развития организма в целом.

Все эти факты, найденные в научной литературе, были настолько убедительными, что Роман Александрович даже предложил ввести новые понятия: «медленная вода» и «бы-



3  
 Вот так выглядит зависимость скорости ферментативных реакций от содержания дейтерия в воде

«медленной» (рис. 3). Воду с содержанием дейтерия ниже земного он назвал «медленной», поскольку в ней большинство реакций протекают медленнее обычного. Однако при достижении 0,030–0,040% вода становится «быстрой», но дальнейшее обогащение дейтерием снова «замедляет» ее.

## Воздействие тяжелых изотопов С, О и N

О влиянии других стабильных изотопов на живые организмы почти ничего не известно. Считается, что токсичность их невелика, а физико-химические свойства образуемых ими соединений идентичны. Масса дейтерия превышает массу водорода  $^1\text{H}$  в два раза, в то время как масса углерода  $^{13}\text{C}$  отличается от массы  $^{12}\text{C}$  всего на 8%. Поэтому, согласно общепринятой модели кинетического изотопного эффекта, незначительное обогащение биологических молекул тяжелыми изотопами углерода не должно сказаться на скорости реакций.

Гипотеза изотопного резонанса говорит другое: скорости биологически значимых процессов достигнут максимума при резонансных значениях изотопов углерода, кислорода и азота в реагирующих молекулах и будут уменьшаться — при удалении от этих значений в любую сторону. Для доказательства Р.А. Зубарев решил исследовать, с какой скоростью растет колония бактерий *E. coli* при различных изотопных композициях атомов углерода, азота и кислорода в питательной среде.

Ученый выращивал бактерии в минимальной среде, содержащей только воду, некоторые неорганические соли и глюкозу как единственный источник углерода. Из этих соединений бактерия способна синтезировать молекулы белков и нуклеиновых кислот. Понятно, что изотопный состав среды неизбежно отразится на содержании изотопов в клеточных белках. Чем быстрее протекают ферментативные процессы, тем быстрее должна расти колония.

В своих экспериментах ученые изменяли изотопный состав питательной среды либо только для одного элемента, либо для нескольких элементов в различных комбинациях одновременно. Оказалось, что как только изотопный состав любого из элементов приближался к резонансному, скорость роста колонии увеличивалась. Исследователи наблюдали и явный синергетический эффект, когда концентрации всех трех элементов достигли резонансной:  $^{15}\text{N}$  ~3,5% (по сравнению со стандартным земным значением 0,37%),  $^{13}\text{C}$  ~ 0,35% (по сравнению с 1,1%),  $^{18}\text{O}$  ~ 6,6% (по сравнению с 0,2%). В этом случае скорость роста колонии бактерий увеличилась в среднем на 2%. Наблюдаемый ученым эффект достигался за шесть часов, при этом концентрация дейтерия оставалась «земной». Очевидно, что, если дополнительно увеличить содержание дейтерия до резонансных 0,03%, эффект будет еще значительнее.

Влияние резонансной концентрации азота-15 на коловраток *Brachionus plicatilis* (продолжительность жизни, начало и продолжительность репродуктивного периода, размер и жизне-

способность потомства) изучала профессор Стокгольмского университета Елена Горохова. Этих многоклеточных животных кормили зелеными водорослями с повышенным содержанием  $^{15}\text{N}$ . Фиксируя измеряемые параметры, исследователь обратила внимание, что на графиках точки с резонансной концентрацией 3,5% постоянно выбивались из общей закономерности. При этом коловратки, получающие водоросли с резонансным содержанием азота-15, были более приспособленными, их продолжительность жизни была немного меньше, но размер и жизнеспособность потомства — выше, чем при любом другом содержании изотопа.

## Есть ли жизнь на Марсе?

Изотопный состав атмосферы на ближайших к нам планетах, Марсе и Венере, значительно отличается от земного, особенно это касается содержания дейтерия: на Марсе его содержание в пять раз больше, на Венере — в сто. Как будет влиять изотопная композиция этих планет на жизнедеятельность организмов? Вопрос тем актуальнее, чем активнее разворачиваются исследования, связанные с возможной колонизацией Марса, в частности реализацией проекта Mars One. Изотопный состав марсианского льда сильно меняется с географией, и наибольшая концентрация дейтерия найдена на полюсах — в противоположность Земле, где на полюсах находится вода, обедненная дейтерием. Поистине, Марс — загадочная планета.

Для изучения этого вопроса Р.А. Зубарев повторил эксперименты по выращиванию бактерий *E. coli* в минимальной среде. На этот раз он имитировал изотопный состав планет-соседей по содержанию дейтерия в питательной среде, оставляя изотопный состав всех остальных элементов таким же, как и на Земле. Ученый сравнивал рост бактерий в четырех различных средах: для двух из них (Венера и Марс) отличие от контрольной среды (Земля) состояло только в концентрации дейтерия, а еще в одной (Марс-N) содержание азота  $^{15}\text{N}$  также было приближено к марсианскому (см. таблицу).

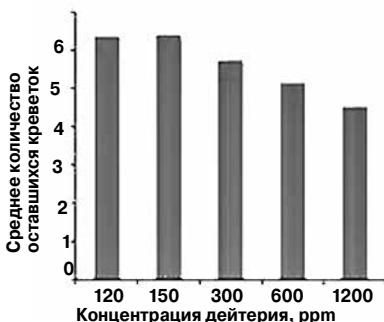
Планета	Доля тяжелого изотопа для каждого элемента			
	D	$^{13}\text{C}$	$^{15}\text{N}$	$^{18}\text{O}$
Марс-N	0,084%	1,1%	0,588%	0,2%
Венера	1,75%	1,1%	0,364%	0,2%
Земля	0,015%	1,1%	0,364%	0,2%
Марс	0,084%	1,1%	0,364%	0,2%

Как и ожидали исследователи, в «условиях» Марса, Марса-N и Венеры плотность выросших колоний оказалась меньше, чем на Земле, причем на Венере — заметно меньше.

От бактерий ученые перешли к более длительным экспериментам на более сложных организмах — на креветках. Для исследователей было важно, что эти морские животные способны выживать в замкнутой среде в течение многих лет. Креветок помещали в специальные полугерметичные пластиковые контейнеры. В каждом контейнере содержалось 300 мл соленой воды желаемого изотопного состава, волокнистые палочки, пластиковые и керамические бусины, водоросли и микробы. Сюда-то и поселяли двух креветок (рис. 4).

Среди 25 контейнеров пять были с нормальным (земным) содержанием дейтерия (0,015%), пять — с низким (0,012%) и пятнадцать — с повышенным содержанием дейтерия (по пять — 0,03, 0,06 и 0,12%). Эксперимент проводили в течение 20 месяцев, каждые две-три недели креветок пересчитывали (когда креветка умирает, она разлагается и потребляется микроорганизмами в течение нескольких дней).

Через 20 месяцев из 50 креветок выжило только 16, наибольшие потери были в контейнерах с максимальным содержанием дейтерия, но и содержание 0,06% (в четыре раза выше земного) негативно сказалось на выживаемости. Очевидно, что изотопный состав, приближенный к составу Марса,



4

*В таких полугерметичных контейнерах выращивали креветок в воде с разным содержанием дейтерия, в том числе и с «марсианским». Высокое (марсианское) содержание дейтерия креветки переносили плохо*

даже за 20 месяцев приводит к частичному вымиранию креветок. А эволюция происходит на протяжении миллионов лет!

Также оказалось, что выживаемость креветок при резонансном содержании дейтерия 0,03% несущественно уменьшилась. Р.А. Зубарев объясняет этот факт более быстрым протеканием большинства биохимических процессов, что, в свою очередь, может означать более короткий срок жизни. Однако данных для четкого ответа недостаточно — средняя продолжительность жизни креветок от года до шести лет, в то время как продолжительность эксперимента — 20 месяцев. Основная причина уменьшения выживаемости при 0,12% — токсичность дейтерия, в то время как уменьшение выживаемости при 0,06% может объясняться совокупностью обеих причин.

Но вернемся к вопросу о том, есть ли жизнь на Марсе. Однозначного ответа на этот вопрос у ученых пока нет. Несмотря на успешность некоторых экспериментов по выращиванию самых неприхотливых лишайников и бактерий в суровых условиях, имитирующих марсианские, вероятность выживания многоклеточных организмов на Марсе чрезвычайно мала. Тем не менее некоторые ученые считают, что много миллионов лет назад жизнь на Марсе существовала, но затем погибла из-за астероидной атаки или другой космической катастрофы.

Гипотеза изотопного резонанса предсказывает, что это маловероятно. Изотопный состав основных элементов жизни — углерода, водорода, кислорода и азота — слишком далек от резонансного для того, чтобы за время существования нашей Солнечной системы на Марсе смогла зародиться жизнь, подобная нашей. Все биологические важные процессы должны протекать там значительно медленнее, и даже при самых благоприятных внешних условиях процесс эволюции затянулся бы еще на много миллионов лет. Более того, планируя будущие межпланетные перелеты и колонизацию Марса, необходимо принимать во внимание не только большой перепад температур, низкую гравитацию, отсутствие магнитного поля, непригодную и разреженную атмосферу Марса, но и различия в изотопной композиции основных элементов, составляющих жизнь на Земле.

## Литература

- Roman Zubarev et al. Early life relict feature in peptide mass distribution // Cent. Eur. J. Biol., 2010, 5(2), 190—196; doi: 10.2478/s11535-009-0069-2
- Roman A.Zubarev. Role of Stable Isotopes in Life—Testing Isotopic Resonance Hypothesis // Genomics Proteomics Bioinformatics, 2011 Apr; 9 (1–2), 15–20; doi: 10.1016/S1672-0229(11)60003-X
- Xueshu Xie, Roman A. Zubarev. Isotopic resonance hypothesis: experimental verification by *Escherichia coli* growth measurements // Scientific Reports, 2015, 5, 9215; doi: 10.1038/srep09215
- Xueshu Xie, Roman A. Zubarev. On the Effect of Planetary Stable Isotope Compositions on Growth and Survival of Terrestrial Organisms // PLoS ONE, 2017, 12(1): e0169296; doi: 10.1371/journal.pone.0169296
- Sergey Rodin, Paola Rebellato, Arne Lundin, Roman A. Zubarev. Isotopic resonance at 370 ppm deuterium negatively affects kinetics of luciferin oxidation by luciferase // Scientific Reports, 2018, 8, 16249; doi: 10.1038/s41598-018-34704-0
- Eivydas Andriukonis, Elena Gorokhova. Kinetic <sup>15</sup>N-isotope effects on algal growth // Scientific Reports, 2018, 7, 44181; doi: 10.1038/srep44181