

БАЛАНС ЭНЕРГИИ И ВЕЩЕСТВА В ЗАКРЫТОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Включение биологических проблем в сферу современных термодинамических представлений привело к следующей классификации энергетических систем:

а) изолированные системы, не имеющие с внешней средой обмена ни веществом, ни энергией;

б) закрытые системы, осуществляющие обмен энергией, но полностью замкнутые в отношении вещества;

в) открытые системы, где обмен веществом и энергией с внешним миром является обязательным для поддержания равновесного состояния.

До последнего времени все без исключения биологические системы справедливо относились к последней категории. Действительно, в природе отсутствуют системы любого уровня организации, от молекулы живого вещества до гетерогенного по своему составу биоценоза, в которых постоянный обмен веществом и энергией с окружающей средой не являлся бы необходимым условием их нормального и длительного существования. Вместе с тем принцип открытых систем на уровне биоценозов, включающих растения, способные трансформировать лучистую энергию для создания химически упорядоченных соединений, и животных, осуществляющих разрушение этих соединений до исходных, энергетически деградированных веществ, теоретически не является абсолютно неизбежным.

Очевидно, что в природе закрытые системы, использующие свободную энергию, поступающую извне, но замкнутые в вещественном отношении, невозможны, поскольку не существует ни изолирующих вещество преград, ни механизмов, регулирующих скорости сопряженных процессов. Заметим, что системы закрытого типа термодинамически ближе к открытым. Как известно, энергетическое равновесие в изолированных термодинамических системах не зависит от скорости протекания в них процессов, и время в качестве необходимого параметра не входит в классические уравнения термодинамики. В биологических системах открытого или закрытого типов скорости реакций являются основной предпосылкой их жизнедеятельности, и от степени сбалансиро-

ванности этих скоростей зависит уровень уравновешенности, а отсюда устойчивости системы.

Иное положение возникает, если в закрытой системе окажется механизм, регулирующий скорости всех составляющих данную систему процессов. Таким механизмом может быть еще не созданное автоматически работающее устройство или сознательная регулирующая деятельность человека. В последнем случае человек, осуществляя функции регулирующего механизма, сам, как биологическое тело, входит в состав закрытого биоценоза.

Рассмотрение энергетических и материальных превращений в закрытой системе, где одним из компонентов является человек, представляет первостепенный интерес. Этот интерес имеет и теоретический характер, так как объектом анализа является беспрецедентный случай закрытой биологической системы, и практический, поскольку может возникнуть необходимость длительно-го существования человека при отсутствии материальной связи с внешним миром.

Попытаемся, в пределах имеющихся знаний, рассчитать основные элементы баланса вещества и энергии в вещественно замкнутом, но энергетически открытом биоценозе. Для расчетов использованы как хорошо известные, вошедшие в учебники величины, так и результаты некоторых специально выполненных измерений. Для простоты расчета некоторые цифры округлены. Сведения по некоторым второстепенным элементам баланса отсутствуют, вследствие чего в некоторых случаях пришлось прибегнуть к достаточно вероятным допущениям.

Величины отдельных показателей, в силу индивидуальных особенностей и иных причин, могут иметь различные значения. В расчетах использованы оптимальные величины, т. е. в некоторых случаях максимально возможные, в других — минимальные. Несомненно, что дальнейшее изучение того или иного процесса приведет к еще более благоприятному положению и рассматриваемая система станет более «экономичной». Другими словами, в строгой форме соблюдается принцип, сформулированный для открытых систем: энергетические превращения осуществляются в них с накоплением минимального количества положительной энтропии для данной конкретной ситуации.

Очевидно, что композиция такой системы должна быть предельно простой, поскольку ее усложнение в свою очередь усложняет регулировку сопряженных процессов. Как видно из приложенной схемы, компонентами этого биоценоза являются фотосинтезирующие растения (водоросли), пищевые животные, человек и комплекс видов микробиальной флоры. Если наличие в данном биоценозе растений и человека очевидно, то включение в него животных и микробов требует пояснения.

Идеальной системой, естественно, была бы двучленная композиция, состоящая из растений и человека. Хорошо известно, что

чем больше звеньев в трофической цепи, тем меньше энергии достигает последнего звена, поскольку энергетические превращения в каждом звене фатально сопровождаются увеличением энтропии. Это положение хорошо разработано в теории биологической продуктивности водоемов, основные принципы которой близки к рассматриваемым здесь вопросам.

Следовательно, включение в систему животных должно быть обусловлено несовершенством двучленного биоценоза, или, другими словами, недостаточной полноценностью водорослей в качестве единственной пищи для человека.

В настоящее время основными объектами массовых водорослевых культур являются протококковые, главным образом виды *Chlorella* и, меньше, *Scenedesmus*. В зависимости от методов культивирования их биохимический состав может варьировать в широких пределах. Например, при азотном голодании количество жира может составить более половины безводного вещества хлореллы. В норме водоросли содержат все необходимые витамины, и 200 г сухого материала удовлетворяют суточную потребность человека. Достаточно богаты водоросли белковыми соединениями, удовлетворительными по аминокислотному составу. Исключением является метионин, содержание которого несколько ниже необходимой нормы.

Существуют различные точки зрения относительно полноценности чисто растительной пищи. Наряду с утверждениями о вполне удовлетворительном и длительном существовании людей, ограничивающихся стопроцентной вегетарианской пищей, принимается, что определенный процент белков должен быть животного происхождения. По-видимому, следует считать, что включение в рацион человека животного материала, если и не абсолютно необходимо, то несомненно полезно, поскольку он снизит общую потребность в азотных соединениях, компенсирует одновременно некоторую неполноценность белков растений и обусловит более разнообразный ассортимент пищевых комбинаций. Эти условия, которые могут быть пополнены дополнительными соображениями, определяют желательность включения в рассматриваемую систему культуры пищевых животных.

Относительно систематического положения таких животных достаточной ясности нет. При выборе последних нужно, по-видимому, исходить из следующих предпосылок, принципиально простых, но не легко решаемых практически.

1. Химический состав в данном случае не вызывает опасений, поскольку большинство животных обладают белками с полным набором незаменимых аминокислот. Не вызывает сомнений, что в комбинации с водорослями любые животные в целом будут представлять вполне полноценный пищевой материал.

2. Животные должны использоваться в качестве пищи растительный материал и, желательно, фекалии человека. В свою оче-

редь они должны полностью потребляться человеком, т. е. не обладать несъедобными частями.

3. Техника культивирования таких животных должна быть проста, надежна и их популяция — обладать высокой скоростью роста. Важным обстоятельством является минимально возможное пространство, занимаемое культурой. Отсюда водные животные менее удобны, поскольку при культивировании последних лимитирующим фактором оказывается дефицит кислорода, а также ограничивающее действие продуктов жизнедеятельности, накапливающихся в культуральной среде.

Очевидно, что удовлетворить перечисленным требованиям могут только беспозвоночные. В этом отношении некоторую помощь оказывает опыт культивирования живого корма для молоди рыб. Практика советских рыбоводных заводов и соответствующие экспериментальные работы свидетельствуют о следующем.

Более или менее удачные результаты получены при культивировании в производственных масштабах ракообразных (*Daphnia magna*), олигохет (*Enchytraeus albidus*), личинок хирономид (*Chironomus dorsalis*) и нематод (*Panagrelus redivivus*). Прочно в практику рыбоводства вошли первые два вида, выход которых на некоторых рыбозаводах достигает сотен килограммов.

Однако все перечисленные виды обладают рядом недостатков. Дафнии требуют относительно больших акваторий; олигохеты более экономны в смысле пространства, но сомнительны в качестве пищевого материала для человека по причине психологического характера (черви!); хирономиды сложны по технике культивирования; нематоды прихотливы в отношении пищи — хорошая культура развивается только на овсянке.

Имеется основание предполагать, что перспективными объектами культивирования могут быть наземные амфиподы из семейства Talitridae. Несколько видов этого семейства обитают на территории СССР. В природных условиях они образуют чрезвычайно плотные скопления, хорошо выдерживают высокую температуру и питаются гниющей растительностью. По-видимому, они обладают быстрым темпом роста и высокой скоростью размножения. В этом отношении требуются специальные исследования, которые окончательно должны привести к заключению о возможности использования этих амфипод в качестве объекта массового культивирования.

Включение в систему микробов принципиально не обязательно. Необходимость переработки продуктов жизнедеятельности животных и человека до соединений, используемых водорослями, очевидна, но данный процесс может быть осуществлен при помощи технических средств. Однако можно предполагать, что технические приемы такой переработки будут более энергоемки, чем биологические реакции, осуществляемые микроорганизмами. Заметим, что обозначенное на схеме единое звено «микробы» на

самом деле может представлять или комплекс различных видов, или, скорее, каскад последовательных культур, каждая из которых настроена на определенный тип реакции.

На приводимой схеме (рис. 1) даны каналы связи между отдельными элементами рассматриваемого биоценоза, по которым

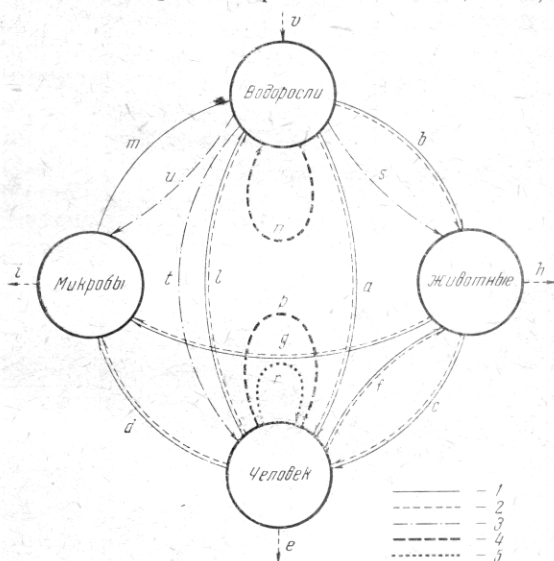


Рис. 1. Схема каналов связи в закрытой системе

1 — вещество на разных уровнях организованности; 2 — энергия; 3 — кислород; 4 — вода; 5 — хлористый натрий; v — утилизируемая водорослями свободная энергия; h , e , i — энергия в обесцененной (тепловой) форме; a , b — энергия и вещество водорослей; c — энергия и вещество пищевых животных; g — экскременты животных; d — выделения человека; f — каловые массы человека; l — мочевина как источник азотного питания водорослей; m — энергетически полностью деградированное вещество; s , t , u — кислород; n — вода, возвращаемая в культуру после концентрирования водорослей; p — вода мочи, используемая для питья; r — возвращаемая с пищей поваренная соль из мочи.

Второстепенные связи на схеме не приведены

происходит миграция энергии и вещества. Очевидно, что поскольку система закрыта, то круговорот вещества осуществляется без потери последнего и без притока новых порций материи извне. Общий баланс энергии выражается количеством утилизированной свободной энергии v и ее рассеянием в обесцененной тепловой форме (h , e , i). Следовательно, $v = h + e + i$.

Количественная характеристика наблюдаемых превращений энергии и вещества может быть выражена в различных формах. Наиболее показательным, очевидно, будет сопоставление вели-

чин скоростей отдельных процессов. Эти скорости могут быть даны или в дифференциальной форме (в виде «мгновенных» скоростей), или выражаться конечными величинами. Последний способ проще и нагляднее, так как не выходит за пределы элементарной арифметики.

Если за единицу времени для всех процессов будет принята одна мера, например сутки, то скорость каждого отдельного процесса будет выражаться соответствующей величиной вещества или энергии, трансформируемой в продолжение одних суток.

Основной цикл энергии и вещества наиболее удобно рассматривать, взяв в качестве исходной величины суточные потребности человека.

Как известно, суммарный расход энергии человеком при работе невысокой интенсивности обычно варьирует в пределах 2000—3000 ккал. Для расчетов примем величину, равную 2400 ккал. Этой величине соответствует примерно 490 г пищи, выражаемой в единицах сухого веса. Приняв, что соотношение растительной и животной пищи должно равняться 5 : 1, и учитывая, что 1 г сухого вещества водорослей эквивалентен 5 ккал и 1 г животной пищи — 4,5 ккал, получаем:

$$\begin{aligned}a + c &= 2400 \text{ ккал, или } 490 \text{ г,} \\ a/c &= 5/1, \\ a &= 2000 \text{ ккал, или } 400 \text{ г,} \\ c &= 400 \text{ ккал, или, приблизительно, } 90 \text{ г.}\end{aligned}$$

Для получения указанного количества животного материала необходимо затратить примерно в 5 раз больше пищи. В первом варианте примем, что единственным пищевым материалом для культивируемых животных будут водоросли. Следовательно, требуется дополнительно 2000 ккал (400 г) растительной массы (b). Отсюда культура водорослей ежесуточно должна продуцировать $a + b = 4000$ ккал (800 г). Очевидно, что $a + b = i$.

Укажем, что современная техника культивирования водорослей позволяет использовать до 20% энергии света. Следовательно, общая потребность в лучистой энергии составит 5 i или 20 000 ккал.

В процессе жизнедеятельности животными усваивается 68% пищи, эта величина принимается по аналогии с жизнедеятельностью других растительноядных ракообразных. Отсюда с неусвоенными продуктами будет теряться 640 ккал, или 255 г сухого вещества, поскольку калорийность 1 г сухих экскрементов ракообразных равна 2,51 ккал. Эти продукты (g) поступят в качестве органического питания в культуру микроорганизмов. Кроме того, туда же войдут каловые массы и органика мочи человека (d) в количестве 228 ккал. Эта величина складывается из калорийности кала (150 ккал, где 1 ккал эквивалентна 1 г) и кало-

рийности мочевины (78 ккал, что соответствует 31 г мочевины по 2,53 ккал/г).

Органические вещества, поступающие в микробиальную культуру, полностью минерализуются и возвращаются в культуральную среду водорослей в энергетически деградированном состоянии (m). Последняя величина может быть подсчитана на основании сведений об элементарном составе поступающих в культуральную среду микробов веществ. Естественно, что она должна уравниваться потерями минеральных веществ, включенных в массу водорослей, вступающую в пищевой цикл.

Таким образом, энергетические потери в отдельных звеньях будут выражаться следующими величинами: рассеяние энергии культурой животных (h) равно 960 ккал, поскольку $h = b - (c + d)$; рассеяние энергии человеком (e) равно примерно 2170 ккал, из расчета $e = (a + c) - d$; рассеяние энергии микробами (i) равно округленно 870 ккал, ибо $i = d + g$.

В итоге, как указано, получаем: $v = h + e + i$, или $4000 = 960 + 2170 + 870$.

Поскольку мочевина может быть непосредственно использована водорослями как источник азотного питания последних, образуется дополнительный канал связи l , суточная характеристика которого будет равна 78 ккал (31 г). Соответственно уменьшится значение d .

Возможен и более экономичный второй вариант, по которому каловые массы человека будут использованы, в качестве пищевого материала, культурой животных. В этом случае потребность последних в водорослях несколько уменьшится и будет равна $b - f$, или $2000 - 150 = 1850$ ккал (370 г). Соответственно уменьшится количество вещества и энергии, поступающих в культуру микробов: величина d будет равна $228 - 150 = 78$ ккал и $i = 720$ ккал. Учитывая же сказанное выше о канале l , можно предположить, что возникнет ситуация, когда функции микробиальной культуры сведутся лишь к переработке экскрементов животных.

Газообмен выражается следующими величинами. Выделяемое в процессе фотосинтеза количество кислорода составит 800 л, поскольку оксикалорийный коэффициент был принят равным 5. Это количество, пропорционально энергетическим затратам в каждом звене, разделяется следующим образом: человек за сутки израсходует 434 л (t), животные — 192 л (s) и микробы — 174 л O_2 (u). В сумме эти величины, естественно, равны 800 л O_2 .

По второму варианту суточная продукция кислорода будет равна $3850 : 5 = 770$ л O_2 , но потребность микробов соответственно уменьшится до 144 л.

Цикл кислорода, обозначенный на схеме стрелками, тождествен циклу углекислоты. В последнем случае направленность стрелок будет, очевидно, обратной.

Круговорот воды представляет несколько большую сложность.

Часть воды (n) возвращается в культуру водорослей после концентрирования последних, причем эта величина определяется исходной плотностью культуры. В концентрированном состоянии водоросли содержат 80% воды; следовательно, с 800 г сухого вещества из культуры удаляется 3200 мл. Пути превращения пищевых материалов связаны с миграцией воды, поскольку влажность этих материалов, как правило, равняется 75—80%. Кроме того, простой расчет показывает, что культура животных теряет на испарение около 1000 мл. Заметим, что потребность в воде животных полностью удовлетворится пищевыми материалами.

Стандартный баланс воды в теле человека выражается следующими величинами:

потребление: питье — 1000 мл, пища — 1000 мл, окисление — 300 мл, всего — 2300 мл;

потери: моча — 1400 мл, кожа — 500 мл, легкие — 300 мл, кал — 100 мл, всего 2300 мл.

Следовательно, общая потребность в воде будет равна 4200 мл, из которых 1000 мл необходимы для питья человека и 3200 мл должны быть возвращены в культуральную среду водорослей. Если моча человека, после соответствующей переработки, будет полностью использована в виде воды надлежащей чистоты¹, то образуется дефицит в 2800 мл (4200—1400). Примерно 1000 мл в составе экскрементов животных будет поступать в культуру микробов и затем, вместе с биогенными элементами и биологически активными веществами (например, витамином В₁₂), — в культуру водорослей. Остальные 1800 мл должны быть поглощены из воздуха и при помощи технических средств также возвращены в водорослевую культуру.

Попытаемся представить, какие величины пространства необходимы для культур водорослей, животных и микробов, производительные возможности которых обеспечат равновесное состояние данной системы. Приводимые ниже расчеты выражены в «чистых» объемах культур, без учета места, занимаемого подсобными техническими устройствами и механизмами.

Современная техника культивирования водорослей позволяет получать до 300 г сухой массы последних в сутки с 1 м³ культуры. Следовательно, для выращивания 770—800 г объем культуры должен составить 2,5—3,0 м³. По-видимому, дальнейшее усовершенствование методики культивирования, селекция используемых видов и испытание новых позволят повысить урожайность культур и, отсюда, уменьшить приведенные величины.

Объем культуры животных может варьировать в широких пределах, в зависимости от экологических особенностей разводимых объектов. Для перечисленных выше видов в настоящее время

¹ В равной мере из мочи должна быть возвращена человеку поваренная соль в количестве 15—20 г.

имеются следующие данные. Суточная продукция, равная 90 г сухого веса, может быть получена при использовании объемов: дафнии — 4,5 м³ (20 г/м³), олигохеты — 1,0 м³, нематоды — 53 л (1,7 г/л), хирономиды — 90 л (1 г/л).

Высказанное выше предположение о перспективности для массовых культур наземных амфипод подтверждается следующими предварительными расчетами. Получение в сутки 90 г сухой массы или 450 г живых рачков потребует величины основной популяции, равной примерно 9 кг. Последняя цифра получена из предположения, что суточный прирост популяции составляет 5% (для дафний он равен 10%). Поскольку условия дыхания в данном случае не имеют решающего значения, общий объем культуры не будет превышать объем культивируемых животных более чем в 5 раз. Следовательно, искомая величина необходимого пространства для разведения наземных амфипод составит 45—50 л.

Объем культуры микроорганизмов может быть ориентировочно определен на основании скорости поглощения микробами кислорода. При дыхании бактерий используется 580—1120 мм³ O₂/час на 1 мг сухого веса (при 20°). Следовательно, в среднем на 1 г поглощается 0,8 л O₂/час или 19,2 л в сутки. Для поглощения 174 л O₂ (и), таким образом, нужно 9 г микробов. Считая, что в плотных культурах на литр среды приходится 7—9 г сухого веса микроорганизмов, получаем минимальный объем культуры, равный примерно 1,0—1,5 л.

В теории биологической продуктивности водоемов широкое применение нашли безразмерные индексы, характеризующие соотношения скоростей отдельных в большей или меньшей мере сопряженных процессов. Подобные индексы могут быть без труда получены и для рассматриваемой системы. Однако, нам кажется, что в данном случае они не могут иметь большого значения, поскольку закрытая система в каждом отдельном звене предусматривает стопроцентное использование возможностей. Кроме того, закрытая система, одним из элементов которой является человек, принципиально отличается от примеров, рассматриваемых теорией биологической продуктивности. Это отличие заключается в том, что низшие уровни системы должны обеспечить не прирост, но равновесное состояние последнего звена — человека. Отсюда, несмотря на многие черты сходства открытых и закрытых систем, последние обладают высокой специфичностью и для дальнейшего изучения требуют не только решения отдельных частных задач, но и принципиально иного подхода к данной новой области биологической науки.