

ЗАМКНУТЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ОТ БИОСФЕРЫ К СИСТЕМАМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ И ОБРАТНО

© 2023 г. С. И. Барцев^{а,*}, А. Г. Дегерменджи^{а,**}

^аИнститут биофизики СО РАН ФИЦ “Красноярский научный центр СО РАН”, Красноярск, Россия

*E-mail: bartsev@yandex.ru

**E-mail: nn1947@yandex.ru

Поступила в редакцию 21.07.2023 г.

После доработки 08.08.2023 г.

Принята к публикации 15.08.2023 г.

В статье приводится краткий обзор современных представлений о природе климатических изменений. Рассмотрены обостряющиеся проблемы биосферных исследований, которые касаются, в частности, дефицита данных и уникальности экосистем. Определено ключевое отличие биосферы от природных экосистем, обеспечивающее длительное, в пределе бесконечное, существование биосферы — сбалансированность круговорота биогенов или замкнутость потоков веществ. Охарактеризованы достоинства лабораторных замкнутых экологических систем (ЗЭС) как инструментов экспериментально-теоретического изучения биосферы. Обсуждается вклад наиболее известных ЗЭС (БИОС-3, микрокосмы Фолсома, Биосфера-2, микро-ЗЭС) в понимание биосферных процессов. Обсуждаются выявленные при математическом моделировании ЗЭС проблемы и парадоксы (парадокс Вернадского—Дарвина, ограничения моделей жёсткого метаболизма), имеющие отношение к известным экологическим парадоксам Мэя и Хатчинсона. Предлагается подход на основе гибкого метаболизма, позволяющий снизить остроту этих парадоксов. С позиции “биосфера как ЗЭС” обсуждаются меры, предлагаемые в рамках так называемой зелёной инициативы, в том числе сокращение углеродного следа домашних животных, переход на электромобили и возобновляемые источники энергии, связывание углерода деревьями. Подчёркивается серьёзность проблемы биосферно-климатических изменений, которая не может быть разрешена без учёта замкнутости веществ в биосфере.

Ключевые слова: замкнутость биосферы, модели биосферы, замкнутые экологические системы, проблемы экологии, парадоксы экологии.

DOI: 10.31857/S0869587323090049, **EDN:** BAEISS



БАРЦЕВ Сергей Игоревич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией теоретической биофизики ИБ СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН. ДЕГЕРМЕНДЖИ Андрей Георгиевич — академик РАН, заведующий лабораторией биофизики экосистем, директор ИБ СО РАН ФИЦ КНЦ СО РАН.

За последний век технологическая мощь человечества достигла уровня, открывающего возможность оказывать глобальное влияние на биосферу в целом. Наибольшую тревогу вызывает глобальное потепление, затрагивающее систему “биосфера—климат” (СБК). В этой связи со стороны различных кругов увеличивается алармистское давление на население разных стран с использованием средств массовой информации, а население в ответ начинает ожидать от руководства своих стран конкретных мер борьбы с климатическими изменениями.

На этом фоне возникла так называемая зелёная инициатива, которая навязывает странам требование трансформировать производственную инфраструктуру, что сопряжено с серьёзными финансовыми затратами, влечёт за собой ослож-

нения в экономике. Как представляется, прежде чем следовать в предложенном руководстве ведущих стран Запада фарватере, необходимо тщательно проанализировать ситуацию с биосферно-климатическими изменениями. Трудности её понимания во многом обусловлены тем, что приходится иметь дело с конгломератом фактов разной степени достоверности и недостаточной проработанными предположениями о причинах наблюдаемых тенденций. Поэтому в первую очередь попытаемся провести ревизию имеющихся фактов.

Факты, с которыми почти никто не спорит

1. Поверхностная среднегодовая температура Земли повышается. Отмечено, что за последние 2000 лет только в XX и XXI вв. наблюдается беспрецедентное когерентное (охватывающее 98% регионов земного шара) повышение глобальной температуры [1].

2. Концентрация CO_2 в атмосфере растёт. Как прямые измерения концентрации CO_2 , проводимые различными климатическими обсерваториями (например, Мауна-Лоа на северном склоне у вершины вулкана на острове Гавайи), так и исследования гренландских и антарктических ледяных кернов показывают, что с начала XVIII в., то есть с начала промышленной революции, концентрация CO_2 монотонно увеличивалась и только в последние годы наметилось замедление её роста.

3. Причина повышения содержания CO_2 в атмосфере — антропогенная эмиссия. Эмиссия углерода в атмосферу приближается, по оценкам, к 10 Гт в год, что составляет чуть менее 20% годичной чистой первичной продукции фотосинтеза наземных растений. На то, что это углерод именно из ископаемых топлив, указывает зарегистрированное уменьшение содержания радиоактивного изотопа C^{14} , которого нет в ископаемых топливах. Чтобы убедиться в том, что вклад человечества в эмиссию углекислого газа даже превышает вклад вулканов, достаточно посмотреть на кривую атмосферной концентрации CO_2 , полученную по данным обсерватории Мауна-Лоа, и попытаться обнаружить в ней последствия извержения вулканов Эль-Чичон и Пинотубо.

Утверждения, с которыми не все согласны

1. Повышение температуры вызвано усилением действия парникового эффекта вследствие антропогенной эмиссии CO_2 и других парниковых газов. Однако попытки объяснить наблюдаемое потепление естественными циклами не получают подтверждения — сейчас должно наблюдаться начало похолодания [2, 3].

2. Происходящие сейчас в результате антропогенного воздействия изменения климата по своим масштабам несопоставимы с естественными, например, периодическими оледенениями Земли. Это не совсем так. На протяжении четырёх ледниковых периодов, имевших место за последние 400 тыс. лет, атмосферная концентрация CO_2 варьировалась с амплитудой ~ 120 ppm [3]. При этом амплитуда изменений глобальной температуры составляла $\sim 12^\circ\text{C}$. Таких изменений температуры мы пока не наблюдаем, а вот прирост концентрации углекислого газа за 300 лет промышленной революции составил ~ 140 ppm.

Последствия этих выбросов могут быть усугублены ненулевой вероятностью перехода через порог устойчивости СБК. Авторы данной статьи, по-видимому, одними из первых [4–6] указали, что вместо медленного роста глобальной температуры возможно развитие катастрофического необратимого процесса после перехода через так называемые даты необратимости. Позднее подобную возможность начали обсуждать другие авторы [7–9], стал употребляться термин “поворотные моменты” (tipping points), что указывает на рост актуальности исследований возможных режимов СБК.

С какими проблемами приходится иметь дело?
Сложность наблюдаемых сегодня процессов состоит в том, что для эффективных действий по предотвращению негативной динамики, а фактически для управления системой “биосфера—климат”, необходим адекватный прогноз ожидаемых глобальных изменений и прогноз реакции СБК на эти действия. Его можно построить только на основе адекватной математической модели, которая невозможна без понимания устройства системы “биосфера—климат” и механизмов, обеспечивающих её стабильность. Какие трудности стоят на пути этих исследований?

Некоторые проблемы, связанные с изучением биосферы, являются общими с проблемами общеэкологическими. К фундаментальным проблемам экологии относятся две: дефицита данных и уникальности экологических систем. Первая из них обусловлена тем, что длительность научных наблюдений за экосистемой несоизмерима с длительностью существования её самой. При этом невозможно осуществлять всесторонний мониторинг природной экосистемы, то есть отслеживать изменения численности или биомассы всех составляющих её видов. Острота этой проблемы экологии может быть существенно ослаблена, если появится возможность сопоставлять и обобщать данные, полученные в результате наблюдений за процессами в разных экосистемах. Однако сопоставлению такого рода данных мешает вторая фундаментальная проблема экологии — уникальность экологических систем: каждая из них

единственна в своём роде, в природе нет одинаковых. Более того, экосистемы со временем изменяются и не воспроизводят собственное поведение даже при совпадении погодных условий. Тем самым требование воспроизводимости экспериментальных данных, лежащее в основе научного подхода, в отношении экологических систем в значительной степени не выполняется. Обе эти проблемы проявляются ещё более остро в отношении биосферы.

Выделим специфическую особенность биосферы, отличающую её от экосистем, используя при этом простую приближённую оценку. Атмосфера Земли содержит ~700 Гт углерода. Масса наземной биомассы в углеродных единицах ~500 ГтС. При этом ежегодная чистая первичная продукция фотосинтеза наземных растений (количество поглощённого углерода, перешедшего в биомассу) составляет ~60 ГтС. Если бы фотосинтез растений был единственным процессом, то они за ~10–15 лет довели бы концентрацию CO_2 в атмосфере до 10% существующего. Этот уровень соответствует компенсационной точке C_3 -растений¹ (они составляют ~95% всех наземных растений), то есть прекращению их роста, а значит, гибели.

Скоростного крушения биосферы не происходит, потому что в природе присутствует направленный обратно в атмосферу поток углерода, образуемого в результате разложения почвенной органики, то есть остатков всех умерших организмов, а также дыхания животных. (К этому явлению мы вернёмся при обсуждении “зелёной инициативы”). Ещё раз подчеркнём ключевое отличие экосистемы от биосферы. Долговременное существование последней обеспечивается сбалансированностью потоков вещества в ней, она называется замыканием. По В.И. Вернадскому, именно замкнутость круговорота веществ обеспечивает длительное, а потенциально — бесконечное, существование земной биосферы.

Вернёмся к проблемам исследования земной биосферы и СБК в целом. Важнейший вопрос — какую модель биосферы можно считать адекватной? Обратимся вначале к определению, которое ниже нам пригодится: “Если между двумя объектами может быть установлено сходство хотя бы в каком-либо одном определённом смысле, то между этими объектами существуют отношения оригинала и модели” [10].

¹ C_3 -фотосинтез — один из трёх основных метаболических путей фиксации углерода, в котором первым продуктом является трёхуглеродное соединение — фосфоглицериновая кислота. C_4 — путь в котором образуется четырёхуглеродное соединение — шавелево-уксусная кислота. САМ — путь в котором разделение ассимиляции CO_2 и цикла Кальвина происходит во времени, а не в пространстве, как в случае C_4 .

Для биофизики характерно построение концептуальных моделей, предназначенных не для точного воспроизведения свойств оригинала, а только его существенных свойств, значимых в контексте проводимого исследования. Полезность такого подхода иллюстрирует общеизвестный школьный пример — математический маятник.

В физике строится математическая модель идеального объекта: материальная точка (объект, имеющий массу, но не имеющий размера, — такого не бывает!) подвешена на невесомой, нерастяжимой, бесконечно тонкой нити с нулевым сопротивлением изгибу (такой не бывает!). При малом угле отклонения α от положения равновесия ($\sin \alpha \approx \alpha$) можно получить простое уравнение свободных колебаний этого маятника. Но, что самое интересное, полученное выражение для зависимости периода колебаний от длины подвеса и

ускорения свободного падения: $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ применимо к реальным физическим маятникам и позволяет рассчитывать их параметры.

Этот пример представляет собой эвристическое обоснование построения достаточно простых моделей биосферы и СБК в целом, главное, чтобы они воспроизводили существенные характеристики моделируемой системы.

Но даже обращение к простым математическим моделям принесёт мало пользы, если у нас отсутствует возможность провести процедуру валидации модели, чтобы она подтвердила свою способность предсказывать поведение реальной системы. А для этого необходимы достаточно длительные временные ряды наблюдений, чего, к сожалению, мы не имеем ни для экосистем, ни для биосферы в целом. Положение представляется безвыходным. Однако не всё так плохо. Помимо математических могут существовать и физические модели биосферы — искусственные замкнутые экологические системы, экспериментальный полигон для разработки моделей биосферных.

Замкнутые экологические системы как инструмент исследования земной биосферы. Искусственные замкнутые экологические системы (ЗЭС) выступают в роли уникального научного инструмента, позволяющего если не обеспечить, то существенно облегчить продвижение в исследовании вышеупомянутых проблем.

Во-первых, экспериментальные ЗЭС по определению обладают замкнутостью, то есть воспроизводят ключевое свойство биосферы, а значит, воспроизведение устойчивого круговорота в эксперименте и объяснение этой устойчивости в математической модели позволят продвинуться в понимании механизмов замкнутости потоков веществ и стабильности биосферы.

Во-вторых, ЗЭС достаточно просты и открыты к их подробному обследованию, что позволяет получить почти полный мониторинг состояния системы, чего невозможно добиться в случае природных экосистем. При этом ЗЭС достаточно сложны, чтобы отображать существенные свойства экосистем, в частности нелинейность взаимодействия и обратные связи, влияющие на их устойчивость.

В-третьих, возможность варьировать условия эксперимента и оказывать в ходе наблюдений тестовые возмущения уникальна сама по себе, в природных экосистемах это неосуществимо. Кроме того, открывается возможность повторять эксперименты, исходя из начальных условий, что на уровне природных экосистем недостижимо.

Конечно, в простой ЗЭС с малым количеством видов некоторые важные нетрофические взаимодействия (опыление, аллелопатия, физическое вытеснение — вытапывание) будут упущены. Результаты, полученные в ходе экспериментов с простыми ЗЭС, задают необходимые, но не достаточные условия устойчивости системы, своего рода скелет устойчивости.

Теоретико-экспериментальное исследование ЗЭС может стать ключом к разрешению упоминавшихся выше проблем экологии. Следуя известному высказыванию выдающегося американского физика, одного из создателей квантовой электродинамики Р. Фейнмана “Чего не могу воссоздать, того не понимаю”², уровень нашего понимания процессов, происходящих в биосфере, можно оценивать на основе умения создавать ЗЭС с заданными свойствами. Имеющийся опыт конструирования и теоретического анализа лабораторных ЗЭС уже позволил понять некоторые особенности биосферы.

Экспериментальные ЗЭС и их вклад в понимание биосферных процессов. Согласно широко распространённому представлению, устойчивость биосферы обеспечивается очень сложной сетью трофических циклов, взаимодействие которых приводит в итоге к достижению замкнутости. То есть, в соответствии с этой гипотезой, обилие видов есть необходимое условие реализации механизмов замыкания биосферы. Для проверки справедливости этого представления есть только один путь — попытаться создать искусственную ЗЭС, для начала — маловидовую.

БИОС-3. Первой экспериментальной ЗЭС, которая продемонстрировала возможность длительного, на протяжении 6 месяцев собственного функционирования с высоким уровнем замыкания, была биорегенеративная система БИОС-3 [11], со-

зданная в 1972 г. Эта система объёмом 315 м³ позволила обеспечить в автономном режиме жизнь экипажа из 3 человек в течение полугода за счёт замыкания цикла по воде и газу почти на 100%, пище — более чем на 50%.

Можно ли на основе экспериментов с БИОС-3 отвергнуть гипотезу о том, что устойчивость замкнутого состояния биосферы обеспечивается разветвлённой трофической сетью? Один из главных результатов БИОС-3 можно сформулировать так: доказано, что при управлении потоками веществ в маловидовой ЗЭС возможно достижение стационарного состояния с достаточно высоким уровнем замыкания потоков веществ. Этот вывод не очень продвигает нас в проверке высказанной гипотезы, но зато имеет огромное значение для практического использования ЗЭС, в первую очередь в космонавтике.

Микрокосмы Фолсома. Эксперименты с микрокосмами — малыми ЗЭС, проведённые американским микробиологом К.Э. Фолсомом [12], имеют прямое отношение к оценке справедливости высказанной гипотезы. Микрокосмы представляли собой стеклянные сосуды объёмом от 1 до 5 л, заполненные морской водой и морскими организмами. Эксперименты показали, что эти мини-экосистемы могут существовать продолжительное время, что служит прямым указанием на то, что для возникновения замкнутого круговорота веществ совсем не требуется сильно разветвлённая трофическая сеть. Однако состав микрофлоры этих микрокосмов был весьма разнообразен.

Сегодня каждый желающий, прочитавший соответствующую статью в популярном журнале [13], может создать мини-ЗЭС. Но если любой любознательный человек может построить модель биосферы, то не означает ли это, что механизмы замкнутости биосферы поняты и можно создавать ЗЭС для космонавтов и управлять биосферой? Выполнен ли критерий Р. Фейнмана? К сожалению, нет. Во-первых, микрокосмы с богатым набором организмов не выживали со 100% надёжностью. Во-вторых, как правило, в системе устанавливалась атмосфера с отличным от земной составом. В-третьих, относительно успешное воспроизведение на практике фрагмента сложной системы не означает, что мы уже достигли понимания её устройства и можем предсказать последствия того или иного воздействия, а это необходимо для решения заявленной задачи — управления биосферными процессами. История создания гигантской ЗЭС “Биосфера-2” (США) в данном контексте очень поучительна.

Биосфера-2. Её создатели на протяжении двух лет пытались смоделировать жизнь поселенческой колонии, состоящей из людей и животных, на Марсе. Проектировщики, вдохновлённые опытами Фолсома, надеялись, что при объедине-

² Фраза “What I cannot create I do not understand” была написана Р. Фейнманом на его рабочей доске и оказалась последней в его жизни.

нии большого количества организмов произойдёт их соорганизация, при этом немаловажную роль они отводили микроорганизмам. Удивительно, но их не насторожило ими же самими упомянутое обстоятельство [14, р. 13, 14], что в мини-биосферах Фолсома устанавливалась атмосфера, сильно отличающаяся по составу от земной.

В ЗЭС площадью 1.27 га и объёмом 203760 м³ размещались пять ландшафтных систем (биомов): океан с коралловым рифом, саванна, тропический дождевой лес, пустыня и болото. Кроме того, она включала в себя сельскохозяйственный блок и дом для жилья. Помимо 8 испытателей систему заселили четырьмя тысячами видов разнообразных представителей флоры и фауны.

Вскоре после начала эксперимента началось падение концентрации кислорода в атмосфере, к которому затем добавилось повышение концентрации CO₂ [15]. Одна из причин быстрого падения концентрации кислорода была связана с использованием для декоративного скального массива молодого бетона, который при созревании поглощает кислород из атмосферы. Концентрация кислорода приблизилась к критически низкой, и пришлось добавлять кислород из баллонов.

Повышение концентрации углекислого газа было вызвано нарушением баланса почвенного дыхания и фотосинтеза растений. На Земле вариации потоков почвенного дыхания и фотосинтеза сглаживаются большой ёмкостью атмосферы, а в “Биосфере-2” слой почвы имел природную толщину, чего нельзя сказать про толщину атмосферы. От таких изменений атмосферы первыми умерли опылители растений (колибри, пчёлы). Затем размножились вредители растений, нематоды, клещи и тараканы, которые стали пожирать посевы испытателей. В конечном счёте сильно похудевшие испытатели еле дотянули до запланированного срока окончания эксперимента.

К сожалению, технические и технологические ошибки, допущенные при проектировании “Биосферы-2”, не позволяют рассматривать этот эксперимент как проверку гипотезы о статистическом механизме обеспечения замкнутости и стабильности земной биосферы. Получается, что простое копирование фрагментов природных экосистем в замкнутой экологической системе жизнеобеспечения не гарантирует успеха. Недостаточно знать устройство отдельного биома (в воспроизведении биомов участвовали известные учёные), важно понимать принципы устройства биосферы в целом.

Микро-ЗЭС. В отличие от микрокосмов Фолсома и подобных аквасистем видовой состав микро-ЗЭС [16] контролировался полностью — некоторые из микро-ЗЭС содержали, например, одноклеточную водоросль (*Chlorella* 21901) и два вида редуцентов (*Pseudomonas* sp., *Mycobacterium*

rubrum). Важно, что при определённых соотношениях биогенов (углерода, азота и фосфора — C:N:P) в микро-ЗЭС устанавливалось стационарное состояние и они могли существовать длительное время. Самый последний живой экземпляр микро-ЗЭС был случайно разрушен вследствие неконтролируемого падения спустя 30 лет(!) после запуска этих экспериментов.

Этот результат однозначно свидетельствует, что для замыкания потоков веществ совсем не нужны сложные трофические сети — организмы обладают достаточной метаболической гибкостью, чтобы замкнуть потоки веществ, причём с очень высокой точностью.

Особенности математического моделирования ЗЭС и возникающие проблемы и парадоксы. Теоретическое и математическое рассмотрение ЗЭС, их специфики по сравнению с обычными экосистемами позволяет выявить свойства биосферы, которые ранее не были очевидны на фоне её потрясающей сложности.

Парадокс Вернадского-Дарвина. Впервые на существование этого парадокса обратили внимание К. Барлоу и Т. Волк (США) [17], которые назвали его парадоксом Вернадского. Авторы формулируют его в форме вопроса: “Как же получается, что входы и выходы мириадных открытых систем образуют жизненную сеть таким образом, что материальная замкнутость, как граничное условие планеты, не разрушает организованные подсистемы”³.

Проиллюстрируем суть проблемы. Каждый вид организмов характеризуется своим составом биогенов — химических элементов, необходимых для нормальной жизнедеятельности организма. Например, в гидробиологии используют стехиометрическое соотношение C:N:P в организмах для описания разных организмов и их состояний.

Рассмотрим типичный процесс: один организм, допустим жертва, поглощается другим, хищником (рис. 1). При этом они имеют разные стехиометрические соотношения, то есть различный состав биогенов. Допустим, доля одного из биогенов (биоген А) у хищника в три раза больше, чем у жертвы. В этом случае для обеспечения нужного количества данного биогена в своей биомассе хищник должен съесть в три раза больше биомассы, при этом остальные биогены ему уже не нужны, они уходят в отходы — потенциальный тупик вещественного круговорота.

Масштабность проблемы становится понятнее, если представить схему движения биогенов по нескольким трофическим уровням, включающим несколько видов (см. рис. 1). Если принять

³ “How is it, then, that the inputs and outputs of a myriad open-system forms a life mesh in such a way that material closure as a boundary condition of the planet does not destroy the organized subsystems?” [17, p. 372].

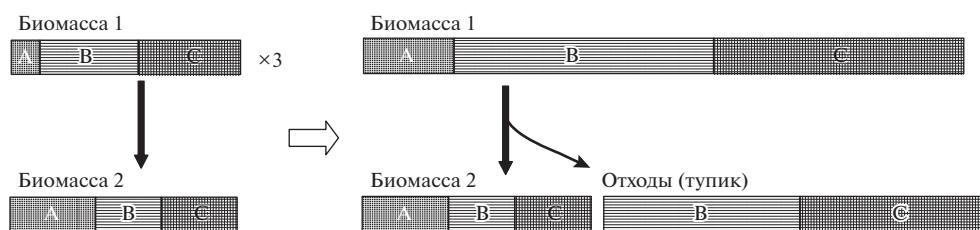


Рис. 1. Условная схема процесса образования органического тупика в экосистеме. Биомасса 1 и биомасса 2 — биомассы организмов, участвующих в трофическом взаимодействии (например, травоядное животное и хищник). А, В, С — биогены (например, фосфор, азот, углерод).

во внимание, что высоkozамкнутое состояние биосферы, с которым она вступила в промышленную революцию, стало результатом её эволюционного и экологического развития, то этот парадокс можно сформулировать следующим образом: замкнутость биосферы не является адаптивным свойством особи (или популяции).

Действительно, в ходе естественного отбора выживает та особь, которая захватывает больше ресурсов и оставляет после себя более жизнеспособное потомство, то есть в ходе естественного отбора организмы побеждают с преимуществом, которое даёт выигрыш здесь и сейчас. Последствия нарушения замыкания биосферы будут проявляться гораздо позже, чем непосредственные результаты отбора. Поскольку замыкание биосферы происходило на фоне естественного отбора, то представляется логичным расширить название этого парадокса и назвать его *парадоксом Вернадского—Дарвина*.

Ограничения моделей жёсткого метаболизма. Как следует из парадокса Вернадского—Дарвина, при моделировании ЗЭС необходимо учитывать круговорот всех существенных биогенов и обеспечивать выполнение законов сохранения по всем биогенам. В то же время традиционные модели экосистем строятся по аналогии с моделями химической кинетики. В этих моделях каждый вид фактически играет роль автокатализатора, потребляющего строго определённые пропорции питательных веществ, аналогичные стехиометрическим коэффициентам химических реакций. Будем называть такие модели моделями жёсткого метаболизма.

Ранее было показано, что если организмы в ЗЭС потребляют субстраты или другие организмы (для консументов) в фиксированной пропорции, то есть с фиксированными стехиометрическими коэффициентами и при количестве разных биогенов свыше двух, то часто в этой системе не может реализоваться стационарное состояние, она сама не может существовать [18]. Причина в том, что когда мы учитываем замкнутость по нескольким биогенам, то число уравнений становится равным числу видов (популяций) плюс ко-

личество биогенов, а вот число переменных в уравнениях (стационарных скоростей роста популяций) остаётся равным числу видов в системе. По законам алгебры система линейных однородных уравнений имеет нетривиальное (ненулевое) решение только в том случае, если ранг матрицы коэффициентов системы меньше числа переменных. Можно проиллюстрировать это ограничение на простой модели ЗЭС [19]. Возможный подход к решению задачи корректного описания стехиометрии экосистем попытаемся сформулировать после рассмотрения дополнительных претензий к моделям жёсткого метаболизма.

Парадоксы Мэя и Хатчинсона. Одним из важнейших препятствий на пути использования моделей жёсткого метаболизма выступает противоположный ход зависимостей устойчивости экосистем от числа входящих в неё видов в случае реальных экосистем и их классических математических моделей. Действительно, в традиционных моделях экосистем при увеличении количества взаимодействующих видов уменьшается область устойчивости в пространстве параметров модели [20]. Данные наблюдений показывают, что увеличение устойчивости экосистем с ростом числа видов встречается в природе гораздо чаще, чем её уменьшение [21]. Иными словами, существует противоречие между трендами изменения устойчивости реальных экосистем и их математических моделей, что указывает на неприменимость указанных подходов к моделированию экосистем. Кроме того, хорошо известный принцип конкурентного исключения гласит, что количество видов, стабильно сосуществующих на одном и том же трофическом уровне, не может превышать количество доступных им ресурсов [22]. Впоследствии принцип конкурентного исключения был расширен и было показано, что несколько видов могут сосуществовать на одном и том же питательном субстрате, если их количество не превышает количество плотностнозависимых контролирующих рост факторов в системе [23, 24].

В природе, однако, наблюдаются ситуации, когда проявляется так называемый парадокс планктона (парадокс Хатчинсона) [25]. Суть его

заключается в том, что существуют экосистемы, в которых количество видов превышает количество зарегистрированных плотностнозависимых контролирующих рост факторов в системе. Такая ситуация может наблюдаться как в водных, так и в наземных экосистемах [26]. Эти данные заставляют прийти к выводу, что для моделирования замкнутых экологических систем вообще и биосферы в частности требуются математические модели, которые если не разрешают окончательно, то, по крайней мере, снижают остроту перечисленных парадоксов и противоречий.

Модели с гибким метаболизмом. В свете перечисленного выше перспективной альтернативой моделям жидкого метаболизма выступают такие, в которых стехиометрические соотношения, а вернее, пропорции потребления субстратов или нутриентов, могут меняться — модели гибкого метаболизма. Видятся всего два варианта гибкого метаболизма: 1) организм, исходя из некоторого критерия, выбирает, какой субстрат преимущественно потреблять; 2) изменение пропорций органических веществ определённого типа (белки, жиры, углеводы), направляемых по анаболическому или катаболическому путям метаболизма.

Вычислительные эксперименты с моделями гибкого метаболизма показали [19, 27–29], что для таких моделей: 1) выполняются наблюдаемые в природе закономерности роста устойчивости с ростом количества видов; 2) характерно большее количество сосуществующих видов в результате появления дополнительных плотностнозависимых контролирующих рост факторов; 3) открывается возможность существования стационарного состояния в условиях полного замыкания и учёта нескольких биогенов.

Возникновение дополнительных плотностнозависимых контролирующих рост факторов при переходе к моделям гибкого метаболизма связано с появлением новых степеней свободы благодаря управлению метаболизмом и потреблением. Уровень межорганизменных взаимодействий дополняется внутриорганизменным управлением. При этом теоретический анализ ЗЭС позволяет определять необходимые (но недостаточные) условия существования системы.

Модели гибкого метаболизма представляются наиболее адекватным инструментом организации и объединения комплексных исследований биосферы с помощью лабораторных ЗЭС и решения упоминавшихся проблем экологии и биосферы.

Взгляд на “зелёную инициативу”, исходящий из представлений о биосфере как ЗЭС. Когда мы рассматриваем биосферу как ЗЭС, то с необходимостью приходим к пониманию, что любое рассогласование, любое пренебрежение теми или иными потоками веществ в биосфере рано или

поздно проявит себя. Такой взгляд на биосферу прекрасно согласуется с особенностями экологии как науки, которую характеризует:

- комплексный подход (необходимо максимально полно учитывать взаимосвязи организмов экосистемы, потоки и действие факторов внешней среды);
- обязательный учёт долговременных последствий.

Отсюда следует, что воздействие той или иной технологии или продукта должно оцениваться всесторонне и на длительном временном интервале. Ранее был предложен подход к интегральной оценке экологического вреда внедряемых технологий, напоминающий модель межотраслевого баланса В.В. Леонтьева [30, 31]. Мы проиллюстрируем эту идею на примере внедрения электромобилей, но сначала предпримем попытку ответа на очень важный вопрос об источниках углеродной эмиссии.

Об углеродном следе домашних животных. Рассмотрение биосферного цикла углерода, проведённое в разделе статьи, озаглавленном “С какими проблемами приходится иметь дело?”, позволяет прийти к очень важному выводу, который вообще не упоминается разработчиками “зелёной инициативы” (или EGS-стратегии): не все источники углерода вредны, не все оказывают негативное влияние на климат. Организмы, которые потребляют органику, синтезированную в процессе фотосинтеза, естественно, выделяют углекислый газ в процессе дыхания и в ходе поствитального разложения — просто возвращают углерод в цикл, обеспечивая дальнейшее существование биосферы. Тем самым получается, что вопрос об углеродном следе домашних животных, который обсуждается в СМИ и сопровождается призывом сократить поголовье домашних животных и перейти на вегетарианство, вообще не имеет смысла. Углеродный след любых животных самих по себе — нулевой, а скорее — отрицательный.

В то же время Аналитическое кредитное рейтинговое агентство (АКРА) под “выбросами парниковых газов понимает их прямой выброс из источников, находящихся в собственности или под контролем оцениваемого лица” [32, с. 13]. Проблема в том, что АКРА учитывает любые выбросы из источников без учёта происхождения углерода. Отсюда следует, что идеологи и организаторы “зелёной инициативы” и АКРА как агент их воли не понимают роли замкнутости в обеспечении существования биосферы. Или понимают, но тогда возникает вопрос о том, какие цели они преследуют. Показательно, что АКРА [32, с. 9] из списка положительных модификаторов оценки предприятия на первое место ставит “наличие у оцениваемого лица облигаций устойчивого развития”! О чём это говорит?

Среди положительных модификаторов оценки предприятий [32, с. 10] в первой половине списка находится “выработка значительной доли энергии из возобновляемых источников”, регулярно упоминается переход на электромобили как важный шаг на пути к декарбонизации. Поэтому стоит уделить внимание этим вопросам.

Об электромобилях. Сами по себе они почти идеальны, их применение действительно улучшит состояние воздуха в больших городах. Однако попытаемся оценить вклад электромобилей в решение той проблемы, которая заявлена в “зелёной инициативе” — сокращение выбросов CO₂.

Электромобиль использует вторичный источник энергии — аккумулятор, который нуждается в периодической зарядке. Отметим, что более 60% процентов электроэнергии на Земле производят тепловые электростанции. Оценим КПД цикла “ТЭС—электромобиль”. Средний КПД ТЭС — 35%, электродвигателя постоянного тока мощностью менее 100 кВт (100 кВт ≈ 140 л.с.) — 82%, литиевого автомобильного аккумулятора — 97%. Перемножаем и получаем ~28%, а это средний показатель КПД бензинового двигателя. С точки зрения выбросов CO₂, электромобиль не даёт никакого выигрыша!

Добавим, что на территории России, особенно в Сибири, большую часть времени года необходим обогрев салона автомобиля, особенно в морозы, достигающие 35–40°C. Если обогрев салона обычного автомобиля не связан с дополнительными финансовыми затратами — поток тёплого воздуха просто направляется на теплообменник, то в случае электромобиля для обогрева салона приходится использовать энергию аккумулятора, ёмкость которого в морозы и так понижается. Это значит, что при зимней эксплуатации КПД электромобиля будет ещё меньше, а выбросов CO₂ будет больше, чем у обычного автомобиля. В таком случае целесообразно ли стимулировать жителей России к переходу на электромобили?

Но это ещё не всё. Если продолжить интегральное рассмотрение последствий внедрения электромобилей, придётся учитывать создание сети станций подзарядки аккумуляторов, для чего потребуется резко и существенно увеличить производство медных кабелей, а производство меди, включая добычу медной руды, очень энергозатратный процесс, связанный с выделением не только углекислого газа, но и ряда других экологически вредных веществ. Кроме того, производство (опять же включая добычу литиевой руды) и утилизация современных литиевых аккумуляторов тоже энергозатратный и экологически вредный процесс.

О возобновляемых источниках энергии. Производство кремния для солнечных батарей — экологически вредный процесс, но и сама их эксплуа-

тация не представляет собой экологический идеал. Для того чтобы можно было использовать солнечную батарею в быту (кстати, почему никто не говорит о применении этих батарей в промышленности, скажем, для выплавки алюминия, на которую идёт, например, 95% мощности Красноярской ГЭС?), необходим аккумулятор для снабжения дома энергией в вечернее и ночное время, когда она более нужна, чем в дневное. А для условий России нужен аккумулятор, который обеспечит жилище в течение долгого зимнего тёмного времени суток при пасмурном небе и заснеженной крыше, что, как очевидно, нереально. Так стоит ли с энтузиазмом внедрять солнечные батареи, когда речь идёт о России?

Интегральный анализ позволяет прийти к заключению, что предлагаемые виды “зелёной” электрогенерации не могут быть использованы как основные не только для промышленности, но и для населения. То есть проблема энергетики гораздо сложнее и требует более серьёзной проработки, чем это представлено в ESG-стратегии.

О связывании углерода деревьями. Существующие леса в основном находятся в климаксом или близком к нему состоянии, то есть обмен углерода с атмосферой у них почти сбалансирован, и они не в состоянии поглотить больше углекислого газа. Понимая это, специалисты пишут об интенсивных посадках [33], но, к сожалению, и здесь не всё так просто.

Посадки новых деревьев сами по себе не решают проблему связывания углерода, поскольку деревья — это временные резервуары углерода и после их отмирания весь углерод возвращается обратно в атмосферу. С одной стороны, посадки позволяют замедлить темпы нарастания концентрации CO₂ в атмосфере, но, с другой — последующее массовое высвобождение углерода из отмерших деревьев может существенно усугубить ситуацию [34]. Кроме того, для организации массовых лесопосадок и последующей обработки больших объёмов древесины потребуются существенные затраты энергии, которая будет поступать от сжигания ископаемых топлив, то есть опять же сопровождаться эмиссией CO₂.

Точка зрения авторов статьи относительно глобальных изменений климата. Мы вовсе не утверждаем, что проблемы изменения климата и его последствий не существует. Наоборот, о том, что последствия сжигания ископаемых топлив могут иметь самые катастрофические последствия, мы писали, начиная с 2003 г. [4–6, 35].

Проблема климатических изменений очень серьёзна, весьма вероятно, что она даже более серьёзна, чем её представляют разработчики ESG-стратегии. Она требует всестороннего исследования для формирования адекватной стратегии преодоления угрозы этих изменений. Никакие

электромобили и солнечные батареи нас не спасут, требуется коренная перестройка технологий и экономики, сопряжённая с большими затратами на практические мероприятия. Перспективным решением было бы, по аналогии с ЗЭС, создание новой “круговоротной” экономики, не имеющей тупиков [36]. Но, к сожалению, руководством стран решения принимаются на основе ложных концепций, лишь маскирующихся под экологические.

Фундаментальная научная, образовательная и практическая задача заключается в разъяснении ситуации лицам, принимающим решения, и внедрении всестороннего экологического образования. В противном случае “зелёным” цветом будет расцветать экологическое мифотворчество (в СМИ постоянно упоминаются зелёное производство, зелёное строительство, зелёные ИТ-технологии, зелёная энергетика, зелёный водород и даже зелёное финансирование и зелёные ценные бумаги). Как бы нам не захлебнуться в этом “зелёном” водовороте.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, грант № 23-44-00059. <https://rscf.ru/project/23-44-00059/>

ЛИТЕРАТУРА

1. *Neukom R., Steiger N., Gómez-Navarro J.J. et al.* No evidence for globally coherent warm and cold periods over the preindustrial Common Era // *Nature*. 2019. V. 571. P. 550–572.
2. *Marcott S.A. et al.* A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years // *Science*. 2013. V. 339. P. 1198–1201.
3. *Mulvaney et al.* Recent Antarctic Peninsula warming relative to Holocene climate and ice-shelf history // *Nature*. 2012. V. 489. P. 141–144.
4. *Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В.* Глобальные обобщённые модели биосферы // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2003. № 2. С. 11–29.
5. *Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В.* Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере // *Доклады АН*. 2005. Т. 401 (2). С. 233–237.
6. *Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Erokhin D.V.* Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics // *Ecological Modelling*. 2008. V. 216 (2). P. 160–171.
7. *Lenton T.M., Held H., Kriegler E. et al.* Tipping Elements in the Earth's Climate System // *PNAS*. 2008. V. 105 (6). P. 1786–1793.
8. *Steffen W. et al.* Trajectories of the Earth System in the Anthropocene // *PNAS*. 2018. V. 115 (33). P. 8252–8259.
9. *Wunderling N., Staal A., Sakschewski B. et al.* Recurrent droughts increase risk of cascading tipping events by outpacing adaptive capacities in the Amazon rainforest // *PNAS*. 2022. V. 119 (32). 11 p. e212077119.
10. *Лернер А.Я.* Начала кибернетики. М.: Наука, 1967.
11. *Гиттельзон И.И., Ковров Б.Г., Лисовский Г.М. и др.* Экспериментальные экологические системы, включающие человека // *Сб. Проблемы космической биологии*. Т. 28. М.: Наука, 1975. С. 292–311.
12. *Folsome C.E., Hanson J.A.* The emergence of materially closed system ecology // *Ecosystem Theory and Application* / Ed. by N. Polunin. N.Y.: John Wiley & Sons, 1986. P. 269–299.
13. *Brown M.J.* Make a Tabletop Biosphere // *Make*. 2008. V. 10. P. 111–117.
14. *Allen J.* Biosphere 2: The Human Experiment. Penguin books, A synergetic press, Inc., 1991.
15. *Nelson M., Dempster W., Alvarez-Romo N., MacCallum T.* Atmospheric dynamics and bioregenerative technologies in a soil-based ecological life support system: initial results from Biosphere 2 // *Adv. Space Res.* 1994. V. 14 (11). P. 417–426.
16. *Ковров Б.Г.* Искусственные микроэкосистемы с замкнутым круговоротом веществ как модель биосферы // *Биофизика клеточных популяций и надорганизменных систем*. Сб. научных трудов. Новосибирск: Наука, 1992. С. 62–70.
17. *Barlow C., Volk T.* Open systems living in a closed biosphere: a new paradox for the Gaia debate // *BioSystems*. 1990. V. 23 (4). P. 371–384.
18. *Bartsev S.I.* Stoichiometric constraints and complete closure of long-term life support systems // *Adv. Space Res.* 2004. V. 34. P. 1509–1516.
19. *Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Сарангова А.Б., Дегерменджи Н.Н.* Экологическая биофизика – горизонты развития // *Горизонты биофизики*. Т. 2. Под ред. А.Б. Рубина. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2022. С. 209–257.
20. *May R.M.* Stability in multi-species community models // *Mathematical Biosciences*. 1971. V. 12. P. 59–79.
21. *Ives A.R., Carpenter S.R.* Stability and diversity of ecosystems // *Science*. 2007. V. 317. P. 58–62.
22. *Гаузе Г.Ф.* Математический подход к проблемам борьбы за существование // *Зоол. журн.* 1933. № 12. С. 170–177.
23. *Дегерменджи А.Г., Печуркин Н.С., Фуряева А.В.* Анализ взаимодействия двух микробных популяций по типу комменсализма в непрерывной культуре // *Экология*. 1978. № 2. С. 91–94.
24. *Дегерменджи А.Г., Печуркин Н.С., Тушкова Г.И., Фуряева А.В.* Механизм устойчивого сосуществования диплоидных и гаплоидных дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в проточной культуре // *Известия СО АН СССР. Серия “Биологические науки”*. 1979. № 5 (1). С. 62–68.
25. *Hutchinson G.E.* The paradox of the plankton // *The American naturalist*. 1961. V. 95 (882). P. 137–145.
26. *Levine J.M., HilleRisLambers J.* The importance of niches for the maintenance of species diversity // *Nature*. 2009. V. 461. P. 254–257.

27. Салтыков М.Ю., Барцев С.И., Ланкин Ю.П. Зависимость устойчивости моделей замкнутых экосистем от числа видов // Журнал СВУ. Серия “Биология”. 2011. № 4. С. 197–208.
28. Saltykov M.Yu., Bartsev S.I., Lankin Yu.P. Stability of Closed Ecology Life Support Systems (CELSS) models as dependent upon the properties of metabolism of the described species // *Advances in Space Research*. 2012. V. 49 (2). P. 223–229.
29. Bartsev S., Degermendzhi A. The Evolutionary Mechanism of Formation of Biosphere Closure // *Mathematics*. 2023 V. 11 (14) Article number 3218. <https://doi.org/10.3390/math11143218>
30. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Okhonin V.A., Saltykov M.Y. An Integrated Approach to the Assessment of an Ecological Impact of Industrial Products and Processes // *Procedia Environmental Sciences*. 2012. V. 13. P. 837–846.
31. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Sarangova A.B. Stability of the Biosphere and Sustainable Development: a Challenge to Biospherics // *Journal of Siberian Federal University. Biology*. 2017. V. 10 (2). P. 134–152.
32. АКРА. Принципы присвоения ESG-рейтингов нефинансовым компаниям. Тематическое приложение 1. 47 с.
33. О полигонах для разработки и испытаний технологии контроля углеродного баланса. Приказ Минобрнауки России № 74 от 5 февраля 2021 г. <https://base.garant.ru/400805179/?ysclid=lladh-du47w508707143> (дата обращения 14.08.2023).
34. Барцев С.И., Дегерменджи А.Г. и др. Влияние неопределённости оценки параметров минимальной биосферной модели на прогноз биосферной динамики // Изв. Самарского НЦ РАН. 2009. № 11 (1–7). С. 1413–1418.
35. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Belolipetsky P.V. Carbon Cycle Modeling and Principle of the Worst Scenario // Jordan F., Jorgensen S.E. (eds). *Models of the Ecological Hierarchy: From Molecules to the Ecosphere* // Elsevier B.V. 2012. P. 447–458.
36. Барцев С.И., Межевикин В.В., Охонин В.А. Принцип замкнутости и критерии оптимального природопользования и устойчивого развития // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2001. № 9. С. 805–814.

CLOSED ECOLOGICAL SYSTEMS: FROM THE BIOSPHERE TO LIFE SUPPORT SYSTEMS AND BACK

S.I. Bartsev^{1,*} and A.G. Degermendzhi^{1,**}

¹*Institute of Biophysics, Siberian Branch of the RAS, Federal Research Center “Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch of the RAS”, Krasnoyarsk, Russia*

^{*}*E-mail: bartsev@yandex.ru*

^{**}*E-mail: nn1947@yandex.ru*

The paper provides a brief overview of the available facts and ideas about the nature of climate change. The problems of ecological research, which are becoming more acute in relation to biosphere research, are considered: this is the problem of data deficit and the problem of the uniqueness of ecosystems. The key difference between the biosphere and natural ecosystems is highlighted, which ensures the long-term, in the ultimate perspective infinite, existence of the biosphere — the existence of a balance of biogen cycles or the closure of the flows of substances. The advantages of laboratory closed ecological systems (CES) as tools for experimental and theoretical study of the biosphere are considered. The contribution of the most well-known CES (BIOS-3, Folsom microcosms, Biosphere-2, micro-CES) to the understanding of biospheric processes is discussed. The problems and paradoxes identified in the mathematical modeling of CESs (Vernadsky-Darwin paradox, limitations of models of rigid metabolism), which are closely related to the well-known ecological paradoxes of May and Hutchinson, are discussed. A flexible metabolism approach is proposed to reduce the severity of these paradoxes. The measures proposed within the framework of so-called “green initiative” are discussed from the position of “biosphere as a CES”. Among these measures are reducing the carbon footprint of pets, migration to electric vehicles and renewable energy sources and carbon sequestration by trees. The seriousness of biosphere-climatic changes problem is emphasized, which cannot be resolved without accounting the closure of substance flows in the biosphere.

Keywords: closure of the biosphere, models of the biosphere, closed ecological systems, problems of ecology, paradoxes of ecology.