



УДК 37.00

## Эксперимент по выращиванию экосистем в легкоусвояемой среде с ограниченными ресурсами

**Сергей Павлюченко,**

ученик 9-го «Г» класса, МАОУ Гимназия, г. Советский

Научный руководитель:

**Мария Борисовна Жепская,**

учитель биологии, МАОУ Гимназия, г. Советский

**Объектом исследования являются искусственные микроэкосистемы в чашках Петри на основе рисового отвара. Цель работы — изучение самоорганизации микробных сообществ в условиях ограниченных ресурсов и формулировка теоретических гипотез, объясняющих наблюдаемую динамику. В ходе эксперимента проводилось микроскопическое наблюдение за развитием биоценозов в течение 24 дней с количественным учётом организмов на 9-й и 24-й дни. Установлено, что развитие микроэкосистемы проходит закономерные этапы: доминирование бактерий, появление водорослей, накопление метаболитов и формирование устойчивых симбиотических комплексов. Ключевым наблюдением стал феномен «пробуждения» коловраток при контакте с воздухом, свидетельствующий о напряжённом газовом балансе внутри замкнутой среды. На основе данных сформулированы гипотезы первичного вещества, симбиотического комплекса и микроэволюции в реальном времени. Разработана математическая модель, формализующая эти гипотезы на основе энергетического подхода с введением понятий энергоёмкости организмов и «осадка» (32 % неусвоенной энергии), воспроизводящая циклическую динамику: поддержание → потребление → кризис → формирование нового биоценоза. Результаты подтверждают возможность самоорганизации микробиоценозов в сверхмалом объёме и могут служить моделью для изучения симбиогенеза, а также иметь практическое значение для разработки замкнутых систем жизнеобеспечения и поиска новых антибиотиков.**

### Ключевые слова:

микроэкосистема,  
самоорганизация,  
симбиотический комплекс,  
первичное вещество,  
математическая модель,  
энергоёмкость, газовый  
баланс, сукцессия,  
ангидробиоз, конкурентное  
исключение

**Объект исследования:** Шесть чашек петри с питательной средой на основе отвара риса.

**Условия:** Температура 24±1 градус, храниться в стерильной коробочке закрытой плёнкой, предварительно всё было стерилизовано ультрафиолетом

**Создание:** Сделав отвар риса и залив его кипятком, оставили его так до остывания закрытым; площадь вокруг также была обработана ультрафиолетом. После остывания я подготовил место и стерилизованные чашки

Петри, обработал место и разлил раствор по 70 мл. Обработав, добавил в каждую из шести чашек по 1,5 мл образца из моего предыдущего исследования и положил их в подготовленное место.

*Метод посева:* в стерильную пастеровскую пипетку набрал 0,125 мл из образца и добавил в чашку Петри, и так я сделал со всеми шестью образцами.

Проблема исследования заключается в выявлении механизмов самоорганизации микробного сообщества в замкнутой среде с лимитированным запасом питательных веществ.

## Наблюдение

Наблюдение за образцами: примерно через 11 часов наблюдались биоплёнки грибов во всех образцах, что может говорить о том, что рис является очень легкоусвояемым источником питательных веществ для микроорганизмов. Через 3 дня появились белые точки — предположительно, колонии бактерий. Через 5 дней я заметил, что образец 4 приобрёл зеленоватый цвет, что можно объяснить тем, что там начали размножаться водоросли. Во всех остальных образцах цвет не изменился, что можно объяснить доминированием бактерий, которые, предположительно, с помощью своих метаболитов подавляют рост численности водорослей (нарушается метаболизм, происходит апоптоз, разрушение мембраны). Также в этих образцах не наблюдалось крупных инфузорий, которые могли бы съесть бактерий; наблюдались только активные, подвижные формы бактерий.

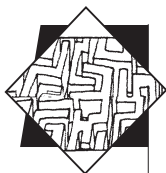
На 9 день вода стала менять свой цвет с прозрачного на светло-коричневый, а образец 1 стал иметь полупрозрачный зелёный оттенок. Такое явление можно объяснить тем, что в среде с ограниченным количеством питательных веществ органические вещества, также легкоусвояемые, быстро заканчиваются, и на смену бактериям приходят фотосинтезирующие организмы, способные потреблять неорганические вещества и использовать солнечный свет как источник энергии для химических реакций. В остальных образцах, где цвет стал светло-коричневым, предположительно, происходит накопление метаболитов; из этого можно сделать вывод, что скоро во всех образцах будут развиваться водоросли, но только при условии, что метаболиты являются неорганическими веществами.

## Гипотеза о веществах

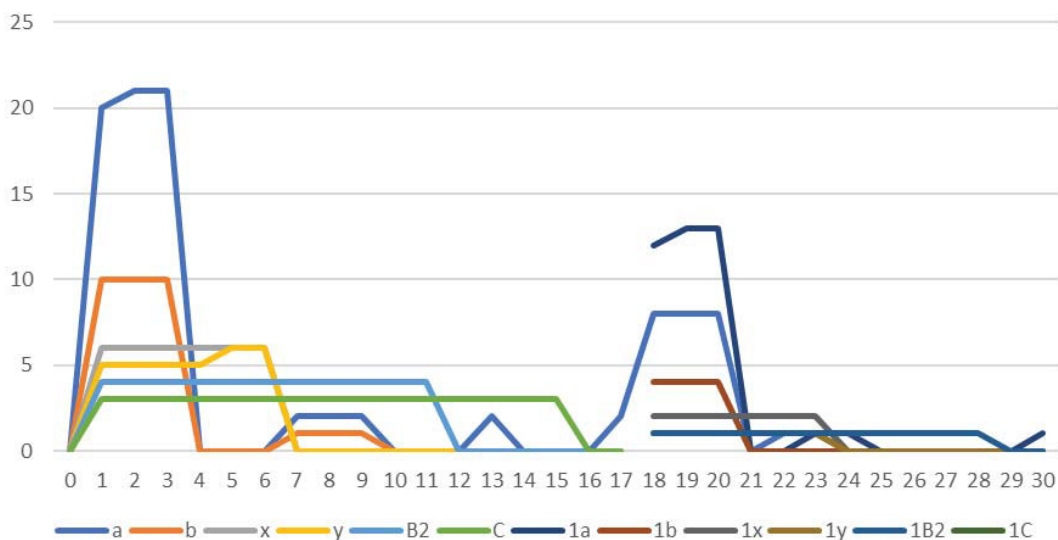
Из этого эксперимента можно сделать вывод и предложить гипотезу о первичном веществе, с которого всегда начинается развитие экосистем. Когда оно заканчивается, организмы переходят на метаболиты и на сами организмы. Ключевыми условиями становятся наличие водорослей, которые будут потреблять неорганику и выделять органику, и наличие как минимум двух организмов, которые будут потреблять органику и выделять неорганику. Отсюда можно предположить, что любое случайное микросообщество и питательная среда, в которой оно находится, будут образовывать микроэкосистему с возможным микроклиматом.

Скорее всего, если в пробах, из которых взята вода для посева, были цисты или другие формы сохранения жизнеспособности инфузорий или коловраток, то они скоро появятся. Если же этого не произойдёт, то бактерии и водоросли будут сменять друг друга. Бактерии и водоросли практически не будут меняться в численности или будут расти, но медленно (это произойдёт только тогда, когда метаболиты одного организма не будут токсичны для другого или их количество будет достаточно, чтобы покрывать пищевые потребности организма).

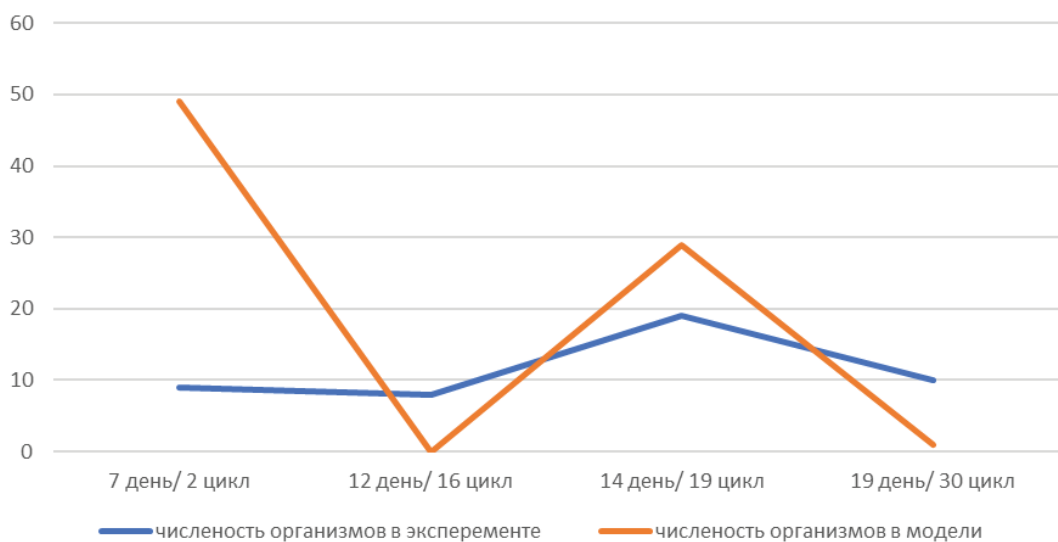
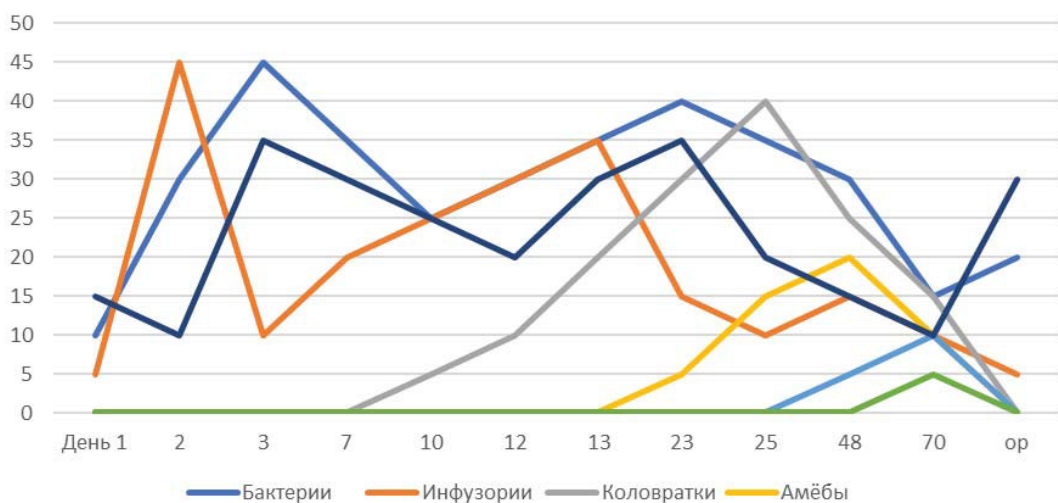
Из этого можно сделать вывод, что концепция первичного вещества адекватно подтвердилась. Эта гипотеза говорит о том, что из случайного микробного сообщества, добавленного в питательную среду с замкнутым пространством, может развиваться микроэкосистема. Также подтверждено, что симбиотические отношения между бактериями и водорослями возможны, что могло послужить основой для образования при таких взаимоотношениях организмов, подобных лишайникам (симбиоз грибов и цианобактерии).

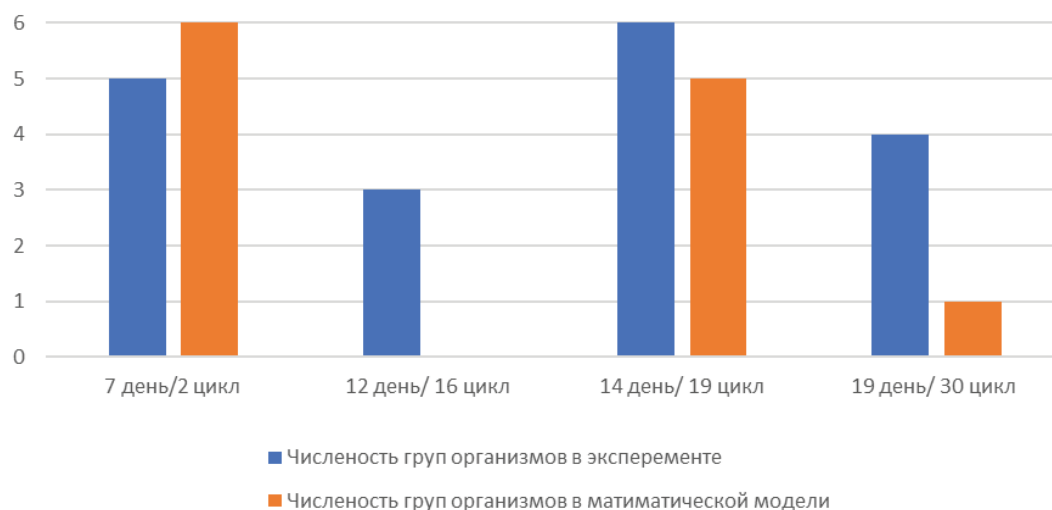


### Гипотеза первичного вещества предсказывается моделью:



От 0 до 4 происходит появление организмов. От 16 до 21 происходит появление организмов второго поколения и питание метаболитами организмов первого поколения. От 21 до 30 происходят трофические взаимодействия между организмами; на 30-й день система упростилась.





Диаграммы, показывающие динамику реальных микрэкосистем. «Ор» — это окончательный результат.

**Первичное вещество:** сначала первичным веществом (листьями, гумусом, мёртвыми животными) питаются продуценты и редуценты. Затем происходит вымирание из-за того, что появляются новые формы организмов (консументы), которые питаются уже продуцентами и редуцентами. Далее происходит второе вымирание — уже из-за недостатка пищи умирают консументы. На их останках происходит создание новой упрощённой системы из водорослей и бактерий; иногда могут появиться инфузории. В этой системе уже не будут появляться крупные виды организмов, так как им постоянно не будет хватать пищи в виде продуцентов и консументов. Фактически, существует **первичное вещество** (листья, гумус), **вторичное вещество** (сами организмы) и **третичное вещество** (метаболиты). Такой гипотезой можно объяснить развитие микросообществ, переход от динамики к самоорганизованной системе.

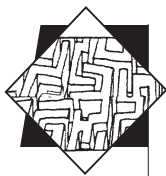
#### Численность организмов на 9-й день

Образец	Цианобактерии	Хлореллы	Бактерии	Маленькие инфузории	Инфузории
1	3 528 000	134 400	6 440 000	70 000	19 600
2	117 880	56 000	3 360 000	39 200	12 000
3	508 760	64 400	700 000	28 200	13 000
4	644 000	22 960	5 650 000	32 000	15 000
5	150 080	43 000	5 460 000	43 200	10 000
6	820 000	36 400	5 040 000	37 360	14 000

#### Численность организмов на 24-й день

Номер образца	Бактерии	Цианобактерии	Водоросли	Инфузории	Микробактерии
1	32 892 480	8 280 000	856 800	348 000	535 000
2	6 792 900	2 160 000	93600	552 000	642 000
3	7 459 000	1 896 000	118 800	492 000	443 000
4	25 732 000	3 579 000	552 000	445 000	512 000
5	7 846 500	1 728 000	81 600	563 000	486 000
6	5 653 000	2 172 000	143 000	329 000	358 000

Микробактерии — активно-подвижные формы бактерий



## Гипотеза симбиотического комплекса в сверхмалых экосистемах

На основе проведённых наблюдений, включая двукратный количественный учёт организмов (на 9-й и 4-й дни), сформулирована теория, объясняющая возникновение и функционирование симбиотического комплекса — конечной стадии самоорганизации искусственной микроэкосистемы в условиях дефицита ресурсов. Комплекс представляет собой устойчивую сеть взаимозависимостей между фототрофами (водоросли, цианобактерии) и гетеротрофами (бактерии, простейшие), где отходы жизнедеятельности одних становятся ресурсом для других, замыкая циклы ключевых веществ. Структурно зрелый комплекс проявляется в виде множества микроскопических биоплёнок, каждая из которых является элементарной единицей системы. Внутри этих образований чётко прослеживается пространственная организация: хлореллы и цианобактерии формируют основу, а в непосредственной близости от них располагаются гетеротрофные бактерии и другие водоросли, создавая локальные «кооперативные кластеры». Вся система в чашке Петри может содержать тысячи подобных автономных комплексов, взаимодействующих между собой через общую жидкую среду.

### Теория и механизмы возникновения

Симбиотический комплекс формируется не сразу, а в результате закономерной сукцессии, запускаемой исчерпанием легкодоступного «первичного вещества» (органических компонентов питательной среды). Эта фаза кризиса выступает эволюционным триггером, вынуждая организмы переходить от стратегии прямой конкуренции за готовую органику к стратегии кооперации. Механизм возникновения основан на переходе к утилизации «третичного вещества» — метаболитов. Система самоорганизуется вокруг базового и наиболее подвижного цикла — газового обмена ( $O_2/CO_2$ ). Фотосинтезирующие организмы, используя внешнюю энергию света, потребляют углекислый газ, выделяемый всеми гетеротрофами, и производят кислород и органику. Гетеротрофы, в свою очередь, обеспечивают фототрофов углекислым газом и минеральными солями. Таким образом, дефицит исходного ресурса компенсируется созданием внутреннего круговорота, где каждый организм косвенно обеспечивает условия для выживания других. Пространственная близость в биоплёнке минимизирует диффузионные пути для метаболитов, повышая эффективность обмена.

### Доказательства

Ключевым доказательством работы сформировавшегося замкнутого цикла служат качественные изменения, наблюдаемые между двумя контрольными точками учёта численности. На 24-й день в образцах отмечены явления, невозможные без устойчивого микроклимата. Важнейшим наблюдаемым феноменом стала активация покоящихся форм при контакте с атмосферным воздухом. Коловратки и крупные инфузории, находившиеся в капле на предметном стекле, оставались неактивными. Однако через 2–3 минуты пребывания на воздухе (то есть в условиях прямого газообмена с атмосферой) они «просыпались» — высушенные коловратки наливались жидкостью, а инфузории начинали активное движение. Этот процесс выхода из ангидробиоза и анабиоза возможен только при быстром насыщении среды кислородом, которого в замкнутой жидкой системе не хватало для их пробуждения. Параллельно в других образцах отмечалось массовое появление крупных инфузорий — организмов с высоким уровнем метаболизма, требовательных к содержанию  $O_2$ . Данные численных учётов подтверждают эту динамику: в образцах с выраженным зелёным цветом (1 и 4 номером) к 24-му дню наблюдалась наибольшая биомасса фототрофов, что косвенно указывает на интенсивный фотосинтез и производство кислорода. Однако сам факт пробуждения крупных форм лишь при доступе к атмосфере доказывает, что внутри жидкой фазы замкнутой системы концентрация  $O_2$  была минимально-критично для них, но достаточной для поддержания базового газового цикла между компонентами биоплёнки. Сопряжённость этих процессов служит прямым свидетельством установления стабильного, но ограниченного газообмена внутри комплексов.

## Выводы и значение теории

Формирование симбиотического комплекса демонстрирует принципиальную возможность возникновения устойчивой, саморегулируемой системы в сверхмалом замкнутом объёме без внешнего притока органических ресурсов. Это даёт три важных следствия. Во-первых, подтверждается гипотеза о том, что жизнь способна поддерживать себя через кооперацию и замыкание биогеохимических циклов даже в экстремально ограниченных условиях, что имеет значение для понимания устойчивости микробных сообществ и разработки замкнутых систем жизнеобеспечения. Наблюдение тысяч изолированных биоплёнок показывает, что устойчивость всей системы обеспечивается не гомогенностью, а модульностью — множеством повторяющихся автономных единиц. Во-вторых, наблюдаемый комплекс служит рабочей моделью для изучения ранних этапов симбиогенеза — процесса, который в макроэволюции привёл к образованию таких интегральных организмов, как лишайники. Пространственная структура биоплёнки, где фототрофы и гетеротрофы находятся в тесном соседстве, имитирует ключевой этап такого сближения. В-третьих, феномен пробуждения организмов только при контакте с воздухом является ярким диагностическим признаком установившегося, но напряжённого газового баланса внутри системы, что даёт простой метод для оценки её метаболического статуса. Таким образом, симбиотический комплекс представляет собой не случайный набор организмов, а закономерный результат самоорганизации жизни перед лицом ресурсного ограничения, существующий в форме множества стабильных микро — городов, биоплёнок.

## Гипотеза микроэволюции в замкнутой микросреде

### Теория

В среде с ограниченным количеством ресурсов и в сверхмалом объёме экосистема способна меняться за неделю, а организмы быстро адаптируются к агрессивным условиям благодаря высокой скорости размножения бактерий и водорослей. Когда система начинает меняться, выживает тот генофонд организмов, который уже приспособлен к новым условиям, и он начинает быстро размножаться. Если такие условия стабилизируются, этот организм колонизирует весь объём среды. При этом могут появиться адаптированные консументы (например, инфузории, коловратки) или новый вид, способный регулировать численность водорослей или бактерий, формируя новую устойчивую систему. Триггером, запускающим этот процесс, могут стать быстроразмножающиеся организмы (водоросли, бактерии), которые активируют спящие формы консументов (инфузории, коловратки, амёбы) или способствуют появлению адаптированных видов. Эта гипотеза описывает дарвиновскую эволюцию и естественный отбор в реальном времени в сверхмалом объёме, демонстрируя, как малые изменения могут приводить к масштабным перестройкам системы.

### Механизм

Ключевой механизм основан на исключительно высокой скорости размножения микроорганизмов в благоприятных условиях. За один день у бактерий могут смениться сотни поколений, что сопровождается постоянным возникновением мутаций. Если мутация оказывается полезной (позволяет быстрее размножаться, эффективнее перерабатывать вещества, лучше поглощать ресурсы), она закрепляется, и её носители постепенно начинают доминировать в популяции. Вредные или бесполезные мутации подавляются другими штаммами. Однако если мутация обеспечивает приспособленность к токсичной или изменённой среде (например, к накопившимся метаболитам или дефициту кислорода), то именно этот генофонд получает преимущество и подавляет рост других штаммов. В таких условиях за очень короткое время (дни) может сформироваться новая колония организмов, значительно более устойчивая к негативным факторам. Этот же механизм объясняет возникновение антибиотикорезистентности: при попадании антибиотика в среду, где уже существуют бактерии с мутацией устойчивости (в том числе в споровом состоянии), эти формы выживают, быстро размножаются и заполняют всю колонию, что приводит к неэффективности лечения.



## Возможное применение

Понимание механизмов ускоренной микроэволюции открывает путь к решению практических задач, прежде всего в борьбе с антибиотикорезистентностью. На основе этой теории предложен экспериментальный подход для поиска новых антибиотиков. Метод заключается в совместном помещении патогенных бактерий и почвенных микроорганизмов в одну питательную среду. Согласно закону конкурентного исключения, выживет и будет доминировать тот вид, который быстрее размножается, эффективнее потребляет ресурсы или научится устранять конкурентов с помощью своих метаболитов. Многократное повторение такого эксперимента с высокой вероятностью приведёт к тому, что хотя бы в одной из культур почвенные бактерии подавят патогенный вид посредством выделяемых веществ. Поскольку процесс происходит в микромасштабе (чашка Петри), он занимает относительно мало времени. Последующим шагом является выделение этих бактериальных метаболитов и проверка их на токсичность для человеческого организма. Таким образом, модель микроэволюции в замкнутой среде может служить инструментом для ускоренного скрининга потенциально новых антибиотиков, позволяя в лабораторных условиях имитировать и изучать эволюционные процессы, занимающие в природе долгие годы.

## Выводы

На основе наблюдений были сформулированы значимые теоретические концепции — гипотеза «первичного, вторичного и третичного вещества», описывающая этапы развития замкнутой системы, и гипотеза микроэволюции в реальном времени, объясняющая быструю адаптацию и смену доминирующих форм в условиях ограниченных ресурсов. Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность самоорганизации сложных микросообществ из случайного микробного сообщества.

Однако интерпретация результатов и глубина выводов ограничены методологическим уровнем исследования. Основным ограничением являлось отсутствие молекулярно-генетических методов анализа, таких как ПЦР, что не позволило точно идентифицировать виды микроорганизмов и проследить генетические изменения в популяциях в ходе микроэволюции. Кроме того, подсчёт организмов проводился визуально под микроскопом без использования автоматических счётных камер, что могло привести к субъективным ошибкам и неточностям в оценке численности и динамики популяций. Отсутствие контроля химических параметров среды (точные концентрации кислорода, углекислого газа, специфических метаболитов) в динамике не позволяет однозначно связать наблюдаемые изменения (например, позеленение или появление инфузорий) с конкретными биохимическими сдвигами.

## Математическая модель

### *Теория модели — базовые принципы и законы*

Математическая модель, строится на нескольких фундаментальных экологических и термодинамических принципах, адаптированных для условий замкнутой системы с ограниченными ресурсами.

**Принцип энергоёмкости организмов:** Каждый вид в системе характеризуется уникальной энергоёмкостью — числовым значением, отражающим количество энергии, необходимое для поддержания одной особи. Виды упорядочены по возрастанию энергоёмкости и ассоциированы с определённой трофической ролью: продуценты (а), редуценты (b), консументы разных порядков (х, у, В, С). Это отражает базовое экологическое правило о различной метаболической стоимости существования организмов на разных уровнях пищевой цепи.

**Правило десяти процентов (закон Линдемана):** при передаче энергии с одного трофического уровня на следующий сохраняется лишь около 10 % от её первоначального количества. В модели это реализовано как прямой механизм: при «поедании» одного организма другим, потребитель получает лишь 10 % энергии съеденной особи.

**Концепция первичного, вторичного и третичного вещества:** модель формализует выдвинутую в эксперименте гипотезу. Первичное вещество — исходный запас легкодоступной энергии (общая энергия системы). Вторичное вещество — энергия, запасённая в биомассе самих организмов. Третичное вещество — энергия, перешедшая в энергетический

осадок (неусвоенные 90 %), который становится потенциальным ресурсом для следующего цикла развития.

**Принцип сукцессии, инициируемой кризисом:** Модель исходит из того, что развитие системы носит фазовый характер. Истощение первичного ресурса (кризис) является триггером для перестройки биоценоза. Это приводит к освобождению экологических ниш и создаёт условия для использования накопленного третичного вещества (осадка) и появления организмов с новой энергоёмкостью.

Таким образом, теоретической основой модели служат классические законы экологии (поток энергии, сукцессия), переосмысленные в контексте сверхмалой замкнутой системы, где все процессы протекают быстро и циклично.

### Механизм работы модели — алгоритм динамики системы

Работа модели представляет собой итерационный процесс расчёта распределения энергии и численности организмов в дискретные моменты времени. Алгоритм можно описать следующими шагами:

**Инициализация:** задаётся исходный запас общей энергии (ОЭ) и набор организмов с их энергоёмкостями, представляющих начальное сообщество.

**Распределение энергии и поддержание организмов:** на каждом шаге общая доступная энергия распределяется между всеми присутствующими видами. Если энергии, приходящейся на вид, недостаточно для покрытия его энергоёмкости, этот вид исключается из расчёта. Процесс повторяется до тех пор, пока оставшаяся энергия не сможет поддерживать оставшиеся виды. Это имитирует конкурентное исключение при дефиците ресурсов.

**Трофические взаимодействия и формирование осадка:** между организмами происходят акты «поедания» согласно заданной трофической сети (например, консумент В питается организмами а, b, x, y). В результате потребитель получает 10 % энергии жертвы, а 90 % переходят в энергетический осадок (О).

**Накопление и использование третичного вещества:** накопленный осадок служит резервом системы. Из него извлекается фиксированная доля (в модели — 32 %), которая становится доступной для формирования нового биоценоза. Этот процесс активируется в фазе кризиса, когда в системе остаются только автотрофы и редуценты (а, b), способные выжить без прямой трофической поддержки.

**Возникновение новых форм:** на этапе обновления системы вводятся организмы с промежуточными значениями энергоёмкости (например, между 2 и 4 появляется организм с энергоёмкостью 3). Энергия от 32 % осадка распределяется между ними по тому же принципу, что и на этапе инициализации. Это моделирует процесс заполнения освободившихся ниш и потенциальное усложнение или упрощение сообщества.

**Механизм работы модели, таким образом, представляет собой циклическую последовательность:** поддержание → потребление → накопление осадка → кризис → использование осадка → формирование нового сообщества.

### Формулы и расчётные соотношения

Количественное описание модели основано на следующих ключевых формулах и правилах, взятых непосредственно из документа:

#### 1. Базовые определения величин:

Общая энергия (оэ) =  $r$  (любое число)  $> 0$ .

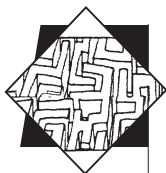
Энергия на вид (э) =  $oэ / \text{количество видов организмов}$ .

Энергоёмкость организма (эно) =  $r > 0$ .

Численность организмов (чо) — количество особей вида, получаемое в результате расчёта.

Энергетический остаток (эо) — энергия, не распределённая между организмами на шаге расчёта.

**Осадок (о)** — энергия, выделившаяся из «убитого» организма в размере 90 % от его энергии и не перешедшая к потребителю. Из осадка извлекается 32 % (это может быть любое другое число) для возможного восстановления системы.



## 2. Расчёт энергетического остатка (эо):

Энергетический остаток(эо)=численность организмов(чо)\*эно =  $x \% * 10 =$  г.г или г или 0.»

Процедура его распределения описана следующим образом:

«если этот остаток будет больше, чем у самый маленький энергоёмкость организмы, например: энергетический остаток=14, энергоёмкость организмов (эно) 2 6,  $14/2=7$   $7/2=3.5$   $7/6=1.1$  то в этом случае эо будет  $0.5+0.1 = 0.6$  в этом случае возьмём формулу эо/численность видов организмов которые остались = если получается 0.г или г которое не подходит под самый энергоёмкий организм, то этот организм не прилучит возможность прибавиться в численности, а этот эо делим на организм который находится позади первого и так дальше когда не получим сходства с организмом или получим число которое больше него...»\*

### Пример:

$18/6=3$  это число не совпадает с 9 значит этот организм не получит +особь а значит остаются только 2 4 6 7 8 (5)  $18/5=3.6$  тоже не совпадает только с 8, значит 2 4 6 7(4)  $18/4=4.5$  тоже не совпадает с 7 и так далее до  $18/3=6$  совпадает с 6 (это в этот случай), отсюда берём:  $6/2=3$ (численность организмов)  $6/4=1.5$   $6/6=1$ . В этом случае эо будет 0.5

Численность организмов: 2(3) 4(1) 6(1) 7(0) 8(0) 9(0)

## 3. Формирование и использование осадка (о):

Осадок(о) от оставшихся 90 % от поглощённого или убитого организма мы извлекаем 32 % и распределяем по такому ужу принципу, как и в начале системы.

Этот осадок становится источником энергии для новых организмов в фазе кризиса.

## 4. Примеры расчётов

Приведены конкретные итерации. Например, шаг 4 демонстрирует расчёт после вымирания организмов а и b:

4)  $A=0$   $b=0$   $x=6$   $y=5$   $V=4$   $C=3$   $21*2=42$   $\%*10=4.2$   $4*10=40$   $\%*10=4$   $\text{эо}=8.2$   $\text{о}=90\%+90\%=37.8+36=73.8$   $8.2(\text{эо})/1=8$   $\text{эо}=0.2$

Здесь  $21*2=42$   $\%*10=4.2$  означает: численность организма А (21) умножается на его энергоёмкость (2), что даёт 42 условных единицы энергии. От этой суммы берётся 10 % (4.2), что, согласно пояснению в документе, является энергетическим остатком (эо), а не энергией для потребителя. Осадок (о) рассчитывается от оставшихся 90 % (37.8). Аналогично для организма b.

Шаги 16–17 показывают накопление осадка и формирование энергии для нового биоценоза:

16)  $A=0$   $b=0$   $x=0$   $y=0$   $V=0$   $C=0$   $3*12=36$   $\%*10=3.6$   $\text{о}=36-3.6=32.4$

17)  $A=2$   $b=0$   $x=0$   $y=0$   $V=0$   $C=0$   $\text{Эо}=1.6$

$\text{О}=73.8+74.7+7.2+36+3.6+32.4=227.7$   $\%*32=72.864$

Суммарный осадок ( $\text{О}=227.7$ ) умножается на 32 %, что даёт энергию для нового сообщества (72.864).

## 5. Ключевое правило активации новой фазы:

Система начинает менять свой биоценоз и активно использовать эти 32 % только когда в системе остаётся только организмы а, b, это связано с тем, что остальные организмы будут сразу съесть новые организмы, как только они появятся, и то, что освободятся новые ниши

Это правило связывает математический механизм с биологическим смыслом — перестройка системы возможна лишь при упрощении трофической сети.

## Вывод

Математическая модель позволяет сделать следующие содержательные выводы об исследуемых микроэкосистемах:

**Подтверждение гипотезы самоорганизации:** Модель демонстрирует, что даже из простого набора правил (поток энергии, конкуренция, накопление осадка) в замкнутой системе может возникать сложная динамика с фазами стабильности и резкой перестройки. Это является формальным подтверждением гипотезы о возможности спонтанного возникновения устойчивых микроэкосистем из случайного сообщества.

**Объяснение наблюдаемой сукцессии:** Расчёты модели качественно воспроизводят последовательность событий, наблюдавшуюся в эксперименте: доминирование бактерий, их смена водорослями, формирование упрощённых симбиотических комплексов. Модель связывает эту смену с исчерпанием «первичного вещества» и переходом на использование «третичного» (метаболитов).

**Роль энергетического осадка как стабилизатора:** Модель выделяет ключевую функцию накопленной, но не использованной напрямую энергии (осадка). Она выступает буфером и ресурсом для восстановления, позволяя системе не коллапсировать полностью после кризиса, а переходить в новое устойчивое состояние, часто более простое и основанное на кооперации.

**Потенциал для прогнозирования:** Модель предлагает количественный каркас для анализа динамики микросообществ. Задавая разные начальные параметры (общая энергия, состав сообщества), можно исследовать, какие конфигурации приводят к длительной устойчивости, а какие — к быстрой деградации. Это открывает путь к использованию подобных моделей для планирования экспериментов с замкнутыми экосистемами или биореакторами.

## Гипотеза исследования

На основе наблюдений можно предположить, что искусственная микроэкосистема, созданная в замкнутом объёме на легкоусвояемой среде (рисовый отвар), проходит несколько стадий самоорганизации, которые определяются не только исходным трофическим ресурсом, но и внутренними метаболическими взаимодействиями.

**Этапность:** Развитие микросообщества должно подчиняться сукцессионной смене: от доминирования бактерий (потребление первичного вещества) к появлению водорослей и формированию симбиотических ассоциаций.

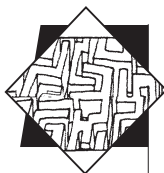
**Кризис и кооперация:** в условиях дефицита ресурсов система не коллапсирует полностью, а перестраивается за счёт использования «третичного вещества» (метаболитов и осадка), что ведёт к образованию устойчивого симбиотического комплекса (биоплёнки), где газообмен ( $O_2/CO_2$ ) замыкается между фототрофами и гетеротрофами.

**Микроэволюция:** Высокая скорость смены поколений у бактерий и водорослей в сверхмалом объёме может приводить к наблюдаемым адаптивным изменениям (дарвиновский отбор в реальном времени), включая активацию покоящихся форм консументов при улучшении газового режима.

**Математическая формализация:** Наблюдаемую динамику можно описать моделью, основанной на энергоёмкости организмов и правиле 10 % (закон Линдемана), где ключевую роль играет накопление «энергетического осадка» (32 %), запускающее новый цикл развития. 📌

## Список использованных источников:

1. *Одум, Ю.* Основы экологии. — М.: Мир, 1975. — 740 с.
2. *Гиларов, А. М.* Популяционная экология. — М.: Изд-во МГУ, 1990. — 191 с.
3. *Begon, M., Townsend, C. R., Harper, J. L.* Ecology: From Individuals to Ecosystems. — Wiley-Blackwell, 2006. — 738 p. (Бегон М., Таунсенд К., Харпер Дж. Экология: От индивидов к экосистемам. — М.: ООО «Лаборатория знаний», 2019. — 854 с. (Перевод выполнен с помощью онлайн-переводчиков)).
4. *Гиттельзон, И. И., Лисовский Г. М.* Созданные человеком замкнутые экологические системы. — М.: Наука, 2005. — 448 с.
5. *Гаузе Г. Ф.* Борьба за существование. — М.: ИКИ, 2002. — 176 с.
6. *Lotka, A. J.* Elements of Physical Biology. — Williams & Wilkins, 1925. — 460 p. (Лотка А. Дж. Элементы физической биологии. — М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 376 с. (Перевод выполнен с помощью онлайн-переводчиков)).
7. *Volterra, V.* Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species living together // ICES Journal of Marine Science, 1928. — P. 3–51. (Вольтерра В. Изменения и колебания численности особей в видах животных, живущих вместе. // Успехи современной биологии. — 1937. — Т. 6, № 2. — С. 291–342. (Перевод выполнен с помощью онлайн-переводчиков)).
8. *Lindeman, R. L.* The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology // Ecology, 1942. — Vol. 23. — P. 399–417. (Линдеман Р. Л. Трофо-динамический аспект в экологии // Классика современной экологии. — М.: Научный мир, 2015. — С. 55–76. (Перевод выполнен с помощью онлайн-переводчиков)).



9. Методы общей бактериологии: В 3-х т. Т. 2 / Под ред. Ф. Герхардта и др. — М.: Мир, 1984. — 336 с.
10. *Рис, Э. Л.* Аллелопатия. — М.: Мир, 1988. — 376 с.
11. *Бродский, А. Л.* Микробные сообщества в экстремальных условиях. — СПб.: Изд-во СПбГУ, 2018. — 268 с.
12. Johnson, K. L. Dynamics of Microbial Ecosystems // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. — 2021. — Vol. 52.. (Джонсон К. Л. Динамика микробных экосистем. // Ежегодный обзор экологии, эволюции и систематики. — 2021. — Т. 52. — С. 171–189. (Перевод выполнен с помощью онлайн-переводчиков)).
13. Smith, R. P. Energy Efficiency in Microbial Competition // Trends in Microbiology. — 2020. — Vol. 28, No. 5. — P. 345–358. (Смит Р. П. Энергоэффективность в условиях конкуренции микробов. // Тренды в микробиологии. — 2020. — Т. 28, № 5. — С. 345–358. (Перевод выполнен с помощью онлайн-переводчиков)).
14. *Замолодчиков, Д. Г., Иванов, А. В., Петрова, Н. С.* Микробные экосистемы как модель экологических процессов // Журнал общей биологии. — 2021. — Т. 82, № 4. — С. 283–301.
15. *Бибикова, С. П., Сидоров, М. А.* Современные проблемы моделирования микроэкосистем // Экология. — 2022. — № 2. — С. 83–91.
16. Brown, T. M. Problems of Validation in Ecological Modeling // Ecological Modelling. — 2023. — Vol. 475. — P. 110–125. (Браун Т. М. Проблемы валидации в экологическом моделировании. // Экологическое моделирование. — 2023. — Т. 475. — С. 110–125. (Перевод выполнен с помощью онлайн-переводчиков)).

---

## An Experiment In Growing Ecosystems On A Digestible Medium With Limited Resources

**Sergey Pavlyuchenko**, 9 g class student MAOU gymnasium of Sovetskiy city

Scientific supervisor: **Maria B. Zhepskaya**, biology teacher, MAOU gymnasium of Sovetskiy city

**Abstract.** The object of the study is artificial microecosystems in Petri dishes based on rice decoction. The aim is to investigate the self-organization of microbial communities under limited resources and to formulate theoretical hypotheses explaining the observed dynamics. The experiment involved microscopic monitoring of biocenosis development over 24 days with quantitative counts on days 9 and 24. It was found that microecosystem development follows regular stages: bacterial dominance, algae appearance, metabolite accumulation, and formation of stable symbiotic complexes. A key observation was the “awakening” of rotifers upon contact with air, indicating a tense gas balance within the closed environment. Based on the data, hypotheses of primary substance, symbiotic complex, and real-time microevolution were formulated. A mathematical model formalizing these hypotheses was developed using an energy-based approach with the concepts of organism energy capacity and “sediment” (32 % of unassimilated energy), reproducing cyclic dynamics: maintenance → consumption → crisis → new biocenosis formation. The results confirm the possibility of microcommunity self-organization in an ultra-small volume and may serve as a model for studying symbiogenesis, as well as have practical implications for developing closed life support systems and searching for new antibiotics.

**Keywords:** microecosystem, self-organization, symbiotic complex, primary substance, mathematical model, energy capacity, gas balance, succession, anhydrobiosis, competitive exclusion

### References:

1. Odum, Yu. Osnovy ekologii. — М.: Mir, 1975. — 740 s.
2. Gilyarov, A. M. Populyacionnaya ekologiya. — М.: Izd-vo MGU, 1990. — 191 s.
3. Begon, M., Townsend, C. R., Harper, J. L. Ecology: From Individuals to Ecosystems. — Wiley-Blackwell, 2006. — 738 p. (Begon M., Taunsend K., Harper Dzh. Ekologiya: Ot individov k ekosistemam. — М.: ООО «Laboratoriya znanij», 2019. — 854 s. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).
4. Gitel'zon, I. I., Lisovskij, G. M. Sozdannye chelovekom zamknutyje ekologicheskie sistemy. — М.: Nauka, 2005. — 448 s.
5. Gauze, G. F. Bor'ba za sushchestvovanie. — М.: IKI, 2002. — 176 s.

6. Lotka, A. J. Elements of Physical Biology. — Williams & Wilkins, 1925. — 460 p. (Lotka A. Dzh Elementy fizicheskoy biologii. — M.-Izhevsk: NIC «Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2001. — 376 s. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).
7. Volterra, V. Variations and Fluctuations of the Number of Individuals in Animal Species living together // ICES Journal of Marine Science, 1928. — P. 3–51. (Vol'terra V. Izmeneniya i kolebaniya chislennosti osobey v vidah zhivotnyh, zhivushchih vmeste. // Uspekhi sovremennoj biologii. — 1937. — T. 6, № 2. — S. 291–342. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).
8. Lindeman, R. L. The Trophic-Dynamic Aspect of Ecology // Ecology, 1942. — Vol. 23. — P. 399–417. (Lindeman R. L. Trofo-dinamicheskij aspekt v ekologii // Klassika sovremennoj ekologii. — M.: Nauchnyj mir, 2015. — S. 55–76. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).
9. Metody obshchej bakterologii: V 3-h t. T. 2 / Pod red. F. Gerhardta i dr. — M.: Mir, 1984. — 336 s.
10. Ris, E. L. Allelopatiya. — M.: Mir, 1988. — 376 s.
11. Brodskij, A. L. Mikrobnye soobshchestva v ekstremal'nyh usloviyah. — SPb.: Izd-vo SPbGU, 2018. — 268 s.
12. Johnson, K. L. Dynamics of Microbial Ecosystems // Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics. — 2021. — Vol. 52. (Dzhonson K. L. Dinamika mikrobnyh ekosistem. // Ezhegodnyj obzor ekologii, evolyucii i sistematiki. — 2021. — T. 52. — S. 171–189. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).
13. Smith, R. P. Energy Efficiency in Microbial Competition // Trends in Microbiology. — 2020. — Vol. 28, No. 5. — P. 345–358. (Smit R. P. Energoeffektivnost' v usloviyah konkurencii mikrobov. // Trendy v mikrobiologii. — 2020. — T. 28, № 5. — S. 345–358. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).
14. Zamolodchikov, D. G., Ivanov, A. V., Petrova, N. S. Mikrobnye ekosistemy kak model' ekologicheskikh processov // Zhurnal obshchej biologii. — 2021. — T. 82, № 4. — S. 283–301.
15. Bibikova, S. P., Sidorov, M. A. Sovremennye problemy modelirovaniya mikroekosistem // Ekologiya. — 2022. — № 2. — S. 83–91.
16. Brown, T. M. Problems of Validation in Ecological Modeling // Ecological Modelling. — 2023. — Vol. 475. — P. 110–125. (Braun T. M. Problemy validacii v ekologicheskom modelirovanii. // Ekologicheskoe modelirovanie. — 2023. — T. 475. — S. 110–125. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).