

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЕ РАБОТЫ УЧАЩИХСЯ

В разделе публикуются исследовательские работы школьников, выполненные в самых разных областях знаний. В журнале представлены исследования участников различных всероссийских конкурсов и конференций.

УДК 631.46: 517.925

Динамика микросистем: экспериментальная проверка математической модели

Сергей Павлюченко,

ученик 9-го класса, муниципальное автономное общеобразовательное учреждение гимназия, г. Советский, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра

Научный руководитель:

Мария Борисовна Жепская,

учитель биологии муниципального автономного общеобразовательного учреждения гимназии г. Советский, Тюменская область, Ханты-Мансийский автономный округ — Югра

Объектом исследования являются искусственные микросистемы в объёме 1,5 мл. Цель работы — экспериментально проверить разработанную математическую модель, прогнозирующую выживание организмов в условиях ограниченных ресурсов на основе принципа энергоэффективности. В работе использованы методы микроскопии, математического моделирования и сравнительного анализа. В ходе эксперимента создано шесть образцов, проводился мониторинг численности инфузорий, водорослей, бактерий и микробактерий. Разработана математическая модель конкуренции пяти типов организмов за энергию. Установлено, что модель верно предсказывает общую тенденцию к доминированию энергоэффективного вида (водоросли) и долгосрочное упрощение системы. Однако эксперимент выявил более сложную нелинейную динамику, включающую «видовой бум» на 14-й день, что обусловлено способностью реальной системы к самоорганизации и созданию новых экологических ниш. Полученные результаты имеют значение для понимания фундаментальных законов экологии, могут применяться в образовательном процессе и при моделировании замкнутых биологических систем.

Введение

Изучение закономерностей функционирования экосистем в условиях ограниченных ресурсов и пространства представляет собой одну из фундаментальных проблем современной экологии. Особый интерес

Ключевые слова:
микросистема,
математическая модель,
энергоэффективность,
конкуренция, видовой бум,
сукцессия, лимитирующие
факторы

в этом контексте представляют микроэкосистемы, которые служат удобными модельными объектами для исследования сукцессионных процессов, трофических взаимодействий и устойчивости. Актуальность таких исследований возрастает в связи с задачами создания замкнутых систем жизнеобеспечения — например, в работе российских учёных под руководством И. И. Гительсона были продемонстрированы принципы создания замкнутых экологических систем для космических миссий, где особое внимание уделялось балансу микроорганизмов в изолированной среде.

Значительный вклад в изучение микромира внесли классические работы — например, исследование А. Л. Бродского «Микробные сообщества в экстремальных условиях» (2018), где автор детально проанализировал динамику простейших в ограниченном объёме и выявил закономерности их адаптации к стрессовым условиям. Зарубежные исследования, такие как работа К. Л. Джонсона «Динамика микробных экосистем» (2021), продемонстрировали важность трофических каскадов в миниатюрных экосистемах, показав, как изменения на одном уровне пищевой цепи влияют на всю систему в целом. Исследование Р. П. Смит «Энергоэффективность в условиях конкуренции микробов» (2020) дополнило эти представления, выявив ключевую роль энергетической эффективности в конкурентных взаимодействиях микроорганизмов.

Однако вопрос о возможности существования устойчивой, динамичной экосистемы в сверхмалом объёме (менее 2 мл) остаётся открытым. Современные исследования, такие как работа коллектива авторов под руководством Д. Г. Замолотчикова «Микробные экосистемы как модель экологических процессов» (2021), показывают, что существующие математические модели, основанные на принципах энергоэффективности и правилах передачи энергии по трофическим цепям, требуют дальнейшей экспериментальной проверки на микроуровне. В частности, в обзоре С. П. Бибиковой и М. А. Сидорова «Современные проблемы моделирования микроэкосистем» (2022) прямо указывается на недостаток экспериментальных данных для валидации теоретических моделей, особенно в отношении долгосрочной динамики микроэкосистем. Аналогичные выводы содержатся в работе Т. М. Брауна «Проблемы валидации в экологическом

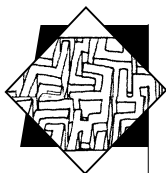
моделировании» (2023), где подчёркивается необходимость сопоставления математических прогнозов с экспериментальными данными.

Настоящее исследование призвано заполнить этот пробел путём экспериментальной проверки теоретических прогнозов, сформулированных на основе математической модели, описывающей выживание организмов в условиях ограниченных ресурсов. Целью данной работы стало установление степени соответствия между теоретическими прогнозами модели и реальным поведением искусственной микроэкосистемы, для чего потребовалось разработать специальную математическую модель, описывающую конкурентные взаимодействия между организмами, создать и наблюдать в течение 14 дней искусственные микроэкосистемы объёмом всего 1,5 мл, а затем провести сравнительный анализ экспериментальных данных с прогнозами модели для оценки её предсказательной способности и выявления факторов, определяющих устойчивость микроэкосистем.

В основу работы легло предположение о том, что математическая модель, базирующаяся на принципе энергоэффективности, верно спрогнозирует общую тенденцию к упрощению микроэкосистемы и доминированию наиболее эффективного вида, даже если реальные биологические взаимодействия внесут определённые коррективы в динамику процесса. При этом ожидалось, что эксперимент выявит более сложную нелинейную динамику, обусловленную способностью реальной биологической системы к самоорганизации.

Настоящая работа является логическим продолжением моего предыдущего исследования «Развитие искусственной микроэкосистемы» и направлена на устранение разрыва между теоретическими прогнозами и экспериментальными данными. Предварительные результаты свидетельствуют о том, что математическая модель адекватно предсказывает стратегический исход конкуренции, однако тактическая динамика реальной системы оказывается значительно сложнее благодаря возникновению новых экологических ниш и трофических связей.

Необходимо отметить, что вся работа, включая разработку модели, постановку эксперимента, сбор и обработку данных, а также анализ результатов, была выполнена автором самостоятельно.



Основная часть

1. Математическая модель конкуренции

Для прогнозирования долгосрочной динамики искусственной экосистемы была разработана детерминистическая математическая модель, основанная на принципе энергетической эффективности. Модель создавалась с учётом современных представлений о трофических взаимодействиях в ограниченных системах. Её фундаментом послужили чётко заданные исходные параметры: начальный запас энергии системы составлял 250 условных единиц, которые распределялись между пятью типами гипотетических организмов. Каждый тип характеризовался уникальной энергоёмкостью — количеством энергии, необходимым для поддержания жизни одной особи: Организм 1 (2 ед.), Организм 2 (5 ед.), Организм 3 (7 ед.), Организм 4 (10 ед.), Организм 5 (15 ед.).

1.1. Ключевые допущения модели

Модель опиралась на ряд принципиальных допущений, определяющих правила взаимодействия в системе:

1. **Стратегия выживания:** организмы 1 и 2, обладая наименьшей энергоёмкостью, были способны выживать в условиях минимального количества пищи или даже его отсутствия, находясь в анабиозе. Организмы 3, 4 и 5, будучи более требовательными, не могли существовать без постоянного притока ресурсов.

2. **Трофические взаимодействия:** в условиях исчерпания первоначального ресурса (свободной энергии) более требовательные организмы (3, 4, 5) начинали потреблять менее энергоэффективные (1 и 2), запуская таким образом внутрисистемный трофический цикл.

3. **Правило 10 %:** при передаче энергии с одного трофического уровня на другой действовал фундаментальный экологический принцип, согласно которому потребитель усваивает лишь 10 % от энергии съеденной биомассы. Остальная энергия рассеивается.

4. **Энергетический остаток:** Энергия, полученная от потребления других организмов, но не израсходованная на рост собственной популяции (например, если её недостаточно для создания новой особи), не исчезала. Она переходила в особый резерв — «энергетический остаток», который использовался для поддержания жизнеспособности организма до следующего цикла расчёта.

1.2. Алгоритм работы модели

Логика работы модели выстраивается как последовательная имитация ключевых этапов развития системы. На первом этапе исходный энергетический пул (250 ед.) делится поровну между всеми пятью типами организмов. Для каждого типа вычисляется начальная численность как результат деления выделенной ему энергии на его энергоёмкость. Дробные особи отбрасываются, формируя первоначальный энергетический остаток (табл. 1).

Поскольку свободная энергия исчерпаема, должна начаться фаза конкуренции. Организмы с высшей энергоёмкостью (5, затем 4, затем 3) последовательно «поглощают» более эффективные, но уязвимые организмы (1 и 2). Расчёт полученной от поглощения энергии ведётся по правилу 10 %. Эта энергия не увеличивает численность потребителя, а направляется в его «энергетический остаток» для поддержания жизни.

После исчерпания организмов 1 и 2 более крупные потребители начинают потреблять друг друга (например, организм 5

Таблица 1

Начальное распределение энергии и расчёт численности

Параметр	Организм 1	Организм 2	Организм 3	Организм 4	Организм 5
Энергоёмкость	2	5	7	10	15
Выделенная энергия	50	50	50	50	50
Расчёт численности	$50/2 = 25$	$50/5 = 10$	$50/7 \approx 7,14$	$50/10 = 5$	$50/15 \approx 3,33$
Итоговая численность	25	10	7	5	3
Энергетический остаток	–	–	0,14	–	0,33



График 1. Динамика численности организмов по математической модели

потреблял организмы 4 и 3), следуя той же логике.

Когда в системе не останется ни одной живой особи, аккумулированные «энергетические остатки» суммируются. Эта энергия служит топливом для восстановления экосистемы. Первыми возрождаются самые энергоэффективные организмы (1 и 2), так как их низкая энергоёмкость позволяет создать максимальное количество особей из ограниченного остатка.

2. Методика эксперимента

2.1. Подготовка образцов

Для проверки модели был поставлен эксперимент. Было создано шесть образцов объёмом по 1,5 мл каждый, содержащих раствор почвы и воды. Образцы готовились по методике, описанной в работе. Для создания идентичных условий использовалась стандартизированная питательная среда. Образцы 1–3 содержались при температуре 19–22 °С, образцы 4–6 – при стабильной 22 ± 1 °С. Освещение – постоянное, интенсивностью 2000 люкс.



2.2. Методы наблюдения и подсчёта

Наблюдения проводились на 7, 12, 14 и 19-й дни. Методика подсчёта организмов основывалась на микроскопии капли объёмом 0,0125 мл с последующей экстраполяцией на весь объём пробы. Использовался микроскоп с увеличением 600х. Подсчитывались: инфузории, мелкие инфузории, водоросли, бактерии, микробактерии (табл. 2).

Таблица 2

Параметры микроскопического исследования

Параметр	Значение
Увеличение	600х
Объём капли	0,0125 мл
Количество полей зрения	5
Коэффициент пересчёта	120

Для бактерий и микробактерий применялась модифицированная методика подсчёта с коэффициентом 40 вместо 5, что позволяло учесть их меньшие размеры и большую концентрацию.



Фото 1. Экспериментальные образцы микроэкосистем

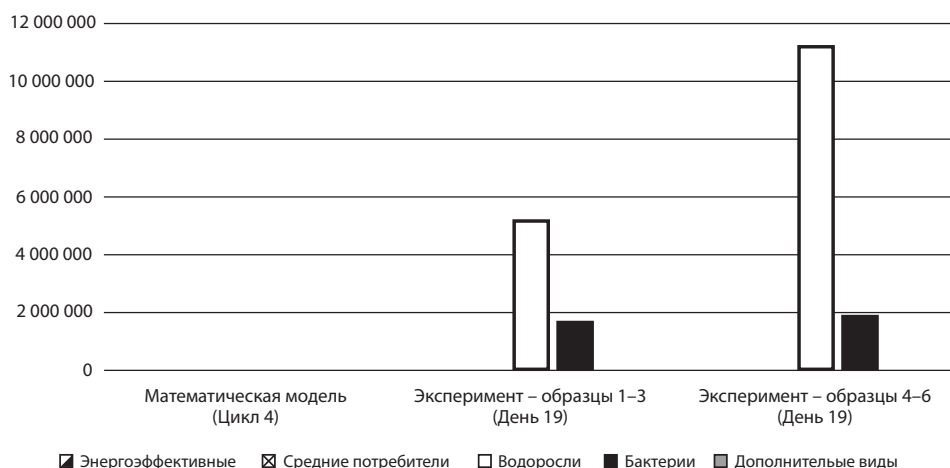
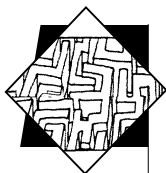


Рис. 1. Сравнение итогового состояния системы

2.3. Контроль параметров среды

Дополнительно фиксировались рН и химические параметры с использованием тест-полосок и портативного фотометра. Измерения проводились в соответствии с методиками, описанными в «Методах общей бактериологии», под редакцией Ф. Герхардта.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

3.1. Динамика численности организмов

Динамика численности организмов в эксперименте кардинально отличалась от модельной. На рисунке 1 представлено сравнение итогового состояния системы в модели и в образцах эксперимента.

Также наблюдались отличия в динамике и между самими образцами, находящимися в разных температурных условиях.

Ключевые результаты эксперимента

7-й день. Во всех образцах зафиксировано высокое биоразнообразие. Наблюдался

рост численности водорослей, при этом в образцах 4–6 (стабильная температура) их численность была на 25–30 % выше.

12-й день (выборочно). Зафиксировано резкое сокращение или исчезновение инфузорий при продолжающемся росте водорослей (таблица 3). Это может указывать на аллелопатическое воздействие.

14-й день. Наблюдался «видовой бум» — появление новых форм инфузорий, круглых червей (нематод) и биоплёнок (таблица 4). Это свидетельствует о самоорганизации системы и формировании новых трофических связей.

19-й день. Стабилизация и упрощение экосистем — наблюдается разделение экосистем по температурному признаку. В группе 1–3 (19–22 °С) произошла смена видового состава водорослей с цианобактерий на хлореллу/хламидомонаду, появились эвглены зелёные. В группе 4–6 (22 ± 1 °С) сохранились цианобактерии, появились коловратки, полностью исчезли инфузории. Количество видов сократилось, системы упростились до трёх-

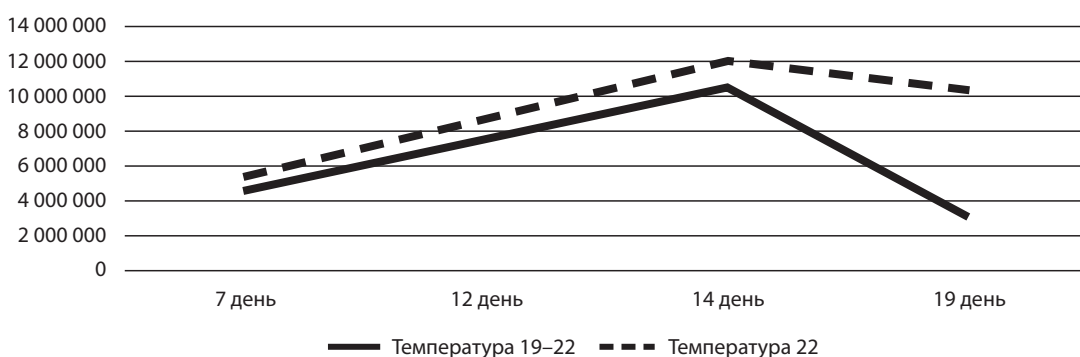


Рис. 2. Динамика численности водорослей в разных температурных условиях

Сравнительные данные по образцам на 12-й день

Образец	Инфузории	Мал. инфузории	Водоросли	Бактерии
2	0	0	7 680 000	1 472 000
3	0	200	6 912 000	1 984 000
6	0	130	8 768 000	1 664 000



Фото 2. Биоплёнки и нематоды в образцах на 14-й день

четырёх основных организмов, что подтверждает предсказание математической модели о выживании наиболее энергоэффективных видов в условиях ограниченных ресурсов.

Это свидетельствует о завершении фазы видового бума и переходе экосистем к устойчивому состоянию с минимальным количеством организмов, оптимальным для самоподдержания в условиях ограниченного объёма.

3.2. Сравнительный анализ модели и эксперимента

Сравнительный анализ выявил как сходства, так и фундаментальные различия между теоретическими прогнозами и экспериментальными данными.

Сходство: и модель, и эксперимент подтвердили доминирование наиболее эффек-

тивного вида — водорослей, использующих неисчерпаемый ресурс (свет). Оба подхода показали общую тенденцию к упрощению системы в долгосрочной перспективе.

Различие: модель предсказала линейное упрощение, тогда как эксперимент показал нелинейную динамику: кризис (12-й день) → усложнение (14-й день). Реальная система продемонстрировала способность к созданию новых экологических ниш (детритофаги-нематоды, симбиотические биоплёнки), что не было заложено в модель.

3.3. Влияние температуры на динамику экосистемы

Интересные различия наблюдались между образцами с разным температурным режимом. В образцах 1–3 (переменная температура) отмечалось большее разнообразие

Таблица 4

Сводные данные эксперимента (средняя численность, тыс. особей)

День	Инфузории	Мал. инфузории	Водоросли	Бактерии	Качественные изменения
7	~190	~600	~4 800	~2 980	Высокое разнообразие
12	0	~110	~7 787	~1 707	Резкое падение численности инфузورий
14	~540	~1870	~10 155	~5 650	Появление червей, биоплёнок
19	~22	~3040	~8 200	~1 800	Смена цианобактерий на зелёные водоросли, появление эвглены зелёной

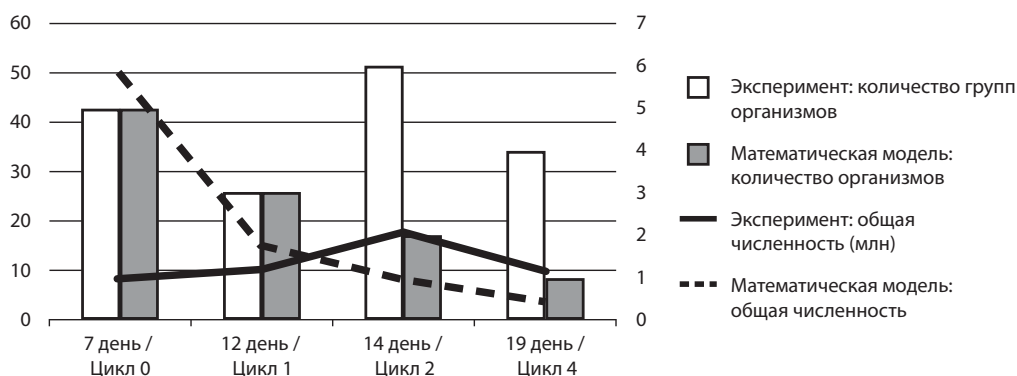
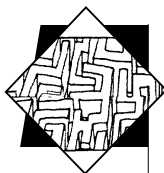


Рис. 3. Сравнение теоретической и экспериментальной динамики системы

инфузорий, тогда как в образцах 4–6 (стабильная температура) доминировали водоросли и бактерии (табл. 5).

Это свидетельствует о том, что температурный режим является важным фактором, влияющим на структуру микрорекосистемы, что не было учтено в первоначальной математической модели.

4. Обсуждение ограничений модели и перспектив развития

Проведённое исследование выявило ряд ограничений математической модели. Главным из них является неучет способности реальных биологических систем к самоорганизации и созданию новых экологических ниш. Кроме того, модель не учитывала влияние внешних факторов, таких как температурные колебания, на динамику системы.

Для совершенствования модели предлагается:

- 1) ввести параметры, описывающие способность организмов к адаптации;
- 2) учесть влияние абиотических факторов;
- 3) добавить возможность формирования симбиотических связей.

Полученные результаты открывают перспективы для создания более адекватных моделей экологических систем, учиты-

вающих как энергетические ограничения, так и способность живых.

5. Использование результатов

Полученные результаты исследования обладают значительным теоретическим потенциалом и широкими перспективами практического применения. Проведённая работа вносит существенный вклад в развитие фундаментальных основ экологии, одновременно открывая возможности для решения прикладных задач в различных областях науки и образования.

Теоретическая значимость

Проведённое исследование позволяет углубить понимание фундаментальных законов функционирования экологических систем в условиях экстремального ограничения ресурсов. Экспериментально подтверждено, что даже в сверхмалом объёме (1,5 мл) возможно не только существование, но и сложная динамика развития экосистемы. Особую ценность представляет выявленный феномен нелинейной динамики, проявляющийся в чередовании фаз кризиса и последующего усложнения системы через механизм «видового бума».

Важным теоретическим достижением работы стало установление границ применимости математических моделей, осно-

Таблица 5

Влияние температуры на видовое разнообразие на 14-й день

Параметр	Образцы 1–3 (19–22 °С)	Образцы 4–6 (22 ± 1 °С)
Количество видов инфузорий	3	1
Численность водорослей	~8 500 000	~11 200 000
Наличие нематод	+	–
Разнообразие биоплёнок	Высокое	Умеренное

ванных исключительно на принципе энергетической эффективности. Как показали результаты исследования, такие модели адекватно описывают стратегические тенденции развития системы, но не способны предсказать тактическую динамику, обусловленную способностью биологических систем к самоорганизации и созданию новых экологических ниш. Это открытие имеет фундаментальное значение для дальнейшего развития теории экологического моделирования.

Практическое применение

Образовательный процесс

Разработанная математическая модель и методика эксперимента обладают значительным потенциалом для применения в современном образовательном процессе. В школьном курсе биологии они могут быть использованы для наглядной демонстрации экологических принципов, включая конкуренцию, трофические цепи, сукцессию и лимитирующие факторы. Компактность экспериментальной установки и её низкая стоимость делают возможным широкое внедрение в практику школьного образования.

Для высшей школы предлагаемая методика представляет особый интерес в контексте изучения основ математического моделирования в экологии. Студенты могут не только наблюдать за динамикой микрорекосистемы, но и проводить сравнительный анализ экспериментальных данных с прогнозами различных моделей, что развивает критическое мышление и понимание ограничений математических методов в биологии.

Моделирование замкнутых систем

Результаты исследования имеют важное значение для проектирования и создания замкнутых биологических систем жизнеобеспечения (БСЖ). В условиях космических миссий или специальных подземных сооружений, где критически важны стабильность и минимальный объём систем, понимание законов упрощения и усложнения экологических сообществ приобретает практическую значимость.

Полученные данные о динамике микрорекосистем позволяют прогнозировать поведение более сложных систем в долгосрочной перспективе. Особую ценность представляет выявленная способность систем к самоорганизации и созданию новых трофических связей, что может быть

использовано для повышения устойчивости искусственных экосистем.

Биотехнологические применения

Изучение биоплёнок, возникших в ходе эксперимента, представляет значительный интерес для развития биотехнологий. Механизмы формирования и функционирования биоплёнок могут быть использованы в разработке эффективных методов биологической очистки воды и утилизации органических отходов.

Кроме того, выявленные закономерности конкурентных взаимодействий микроорганизмов могут найти применение в аквакультуре и сельском хозяйстве для управления составом микробных сообществ и оптимизации продуктивности экосистем.

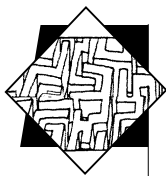
Сравнительный анализ с существующими аналогами

Предлагаемый подход обладает рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами экологического моделирования. В отличие от классических аквариумных моделей, использование микрообъёма (1,5 мл) позволяет на несколько порядков сократить время наблюдения за экологическими процессами и значительно уменьшить ресурсозатраты на проведение экспериментов.

По сравнению с существующими математическими моделями, разработанная в ходе исследования модель была подвергнута комплексной экспериментальной проверке, что позволило не только подтвердить её адекватность, но и выявить конкретные направления для дальнейшего совершенствования. Это отличает данную работу от многих теоретических исследований, ограничивающихся только математическим моделированием без экспериментальной валидации.

Перспективы внедрения и коммерциализации

Для практической реализации образовательного потенциала работы необходимо разработать план внедрения результатов в учебный процесс. Он может включать в себя следующие шаги. На первом этапе предполагается создание комплекта методических материалов, включающего руководство для преподавателей и пособие для учащихся. Параллельно будет разработан стандартный набор реактивов и оборудования, необходимый для проведения экспериментов.



Оценка временных рамок показывает, что для полного внедрения методики в образовательный процесс потребуется 6–8 мес. За этот период планируется провести апробацию в базовых учебных заведениях, доработать методические материалы с учётом полученных замечаний и наладить систему распространения учебных наборов.

Коммерческий потенциал проекта связан с организацией производства и продажи готовых учебных комплектов «Микроэкосистема своими руками» для школ и кружков биологического профиля.

Научно-технологические перспективы

В среднесрочной перспективе (два-три года) результаты исследования могут быть использованы для создания более сложных модельных систем, имитирующих функционирование естественных экосистем в миниатюре. Это открывает возможности для проведения масштабных экологических экспериментов в лабораторных условиях, что особенно актуально в контексте изучения влияния различных факторов на стабильность экологических систем.

Дальнейшее развитие математической модели с учётом выявленных в исследовании ограничений позволит создать более совершенный инструмент для прогнозирования динамики экологических систем. В частности, планируется введение параметров, описывающих способность организмов к адаптации, учёт влияния абиотических факторов и возможность формирования симбиотических связей.

Таким образом, проведённое исследование открывает широкие возможности как для фундаментальных научных изысканий, так и для практических применений в образовании и биотехнологии, что подчёркивает его комплексный характер и многоплановую значимость.

Заключение

Проведённое исследование было направлено на экспериментальную проверку математической модели, прогнозирующей динамику микроэкосистем в условиях ограниченного объёма на основе принципа энергоэффективности. В результате выполненной работы были получены следующие ключевые выводы.

Во-первых, была успешно разработана и апробирована детерминистическая мате-

матическая модель конкуренции пяти типов гипотетических организмов за ограниченный энергетический ресурс. Модель, основанная на принципах энергоэффективности и правилах передачи энергии в трофических цепях (в частности, правиле 10%), верно предсказала стратегический исход конкурентных взаимодействий — долгосрочное доминирование наиболее энергоэффективного вида (в эксперименте эту роль выполнили водоросли) и общую тенденцию к упрощению структуры системы. Это подтверждает, что базовые экологические законы, такие как конкуренция за лимитирующий ресурс и эффективность использования энергии, являются фундаментальными и проявляются даже в сверхмалых объёмах.

Во-вторых, экспериментальная часть работы наглядно доказала, что в микрообъёме (1,5 мл) возможна не просто стагнация, а сложная, нелинейная динамика искусственной экосистемы. Наблюдаемое чередование фаз — от первоначального высокого разнообразия через кризис (резкое падение численности инфузорий на 12-й день) к последующему усложнению («видовой бум» на 14-й день с появлением нематод и биопленок) — свидетельствует о высокой пластичности и способности биологических систем к самоорганизации. Эта способность, не заложенная в исходную модель, является ключевым фактором, объясняющим расхождение между теоретическими прогнозами и экспериментальными данными на тактическом уровне.

В-третьих, сравнительный анализ выявил как сильные стороны, так и ограничения математической модели. Модель адекватно описывает системные тенденции, связанные с потоком энергии, но не учитывает системные свойства реальных биологических систем, такие как:

- способность к формированию новых трофических связей и экологических ниш;
- влияние абиотических факторов (в эксперименте была зафиксирована разная динамика в образцах с переменной и стабильной температурой);
- возникновение симбиотических отношений и аллелопатических взаимодействий (например, возможное подавление инфузорий водорослями).

Практическая значимость работы носит многоплановый характер. Теоретическая ценность заключается в углублении понимания фундаментальных экологических принципов и установлении гра-

ниц применимости моделей, основанных исключительно на энергетических параметрах. Практическая ценность подтверждена разработкой учебной методики, которая может быть использована в школьном и вузовском образовании для демонстрации экологических процессов, а также в области моделирования замкнутых биологических систем жизнеобеспечения.

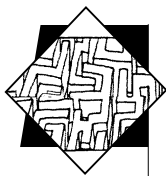
Перспективы дальнейших исследований видятся в усовершенствовании математического аппарата. Для повышения предсказательной силы модели целесообразно ввести параметры, описывающие:

- 1) адаптационный потенциал организмов;
- 2) влияние ключевых абиотических факторов (температура, pH, освещённость);
- 3) вероятность формирования симбиотических связей и возникновения новых трофических уровней.

Таким образом, данное исследование не только достигло своей первоначальной цели, установив степень соответствия между моделью и экспериментом, но и открыло новые направления для научного поиска, подчеркнув сложность и нелинейность экологических процессов даже в предельно упрощённых системах. 📌

Список использованных источников:

1. *Одум Ю.* Основы экологии. — М.: Мир, 1975. — 740 с.
2. *Гиляров 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. *Гительзон 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)).



Microecosystem Dynamics: Experimental Validation of a Mathematical Model

Sergey Pavlyuchenko, 9th grade student, Municipal Autonomous General Education Institution Gymnasium of Sovetsky, Tyumen Oblast, Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra

Supervisor: **Maria B. Zhepskaya**, Biology Teacher, Municipal Autonomous General Education Institution Gymnasium of Sovetsky, Tyumen Oblast, Khanty-Mansi Autonomous Okrug — Yugra

Abstract. The object of the study is artificial microecosystems in the volume of 1.5 ml. The purpose of the work is to experimentally test the developed mathematical model that predicts the survival of organisms in conditions of limited resources based on the principle of energy efficiency. The methods of microscopy, mathematical modeling and comparative analysis are used in the work. During the experiment, 6 samples were created, the number of ciliate, algae, bacteria and microbacteria was monitored. A mathematical model of competition between five types of organisms for energy has been developed. It was found that the model correctly predicts the general trend towards the dominance of an energy-efficient species (algae) and the long-term simplification of the system. However, the experiment revealed a more complex nonlinear dynamic, including a “species boom” on the 14th day, which is due to the ability of the real system to self-organize and create new ecological niches. The results obtained are important for understanding the fundamental laws of ecology and can be used in the educational process and in modeling closed biological systems.

Keywords: microecosystem, mathematical model, energy efficiency, competition, species boom, succession, limiting factors

References:

1. Odum Yu. *Osnovy ekologii*. M.: Mir, 1975. 740 s.
2. Gilyarov A. M. *Popolyacionnaya ekologiya*. M.: 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*. M.: OOO «Laboratoriya znaniy», 2019. 854 s. (Perevod vypolnen s pomoshch'yu onlajn-perevodchikov)).
4. Gitel'zon I. I., Lisovskij G. M. *Sozdannye chelovekom zamknutyje ekologicheskie sistemy*. M.: Nauka, 2005. 448 s.
5. Gauze G. F. *Bor'ba za sushchestvovanie*. M.: IKI, 2002. 176 s.
6. Lotka A. J. *Elements of Physical Biology*. Williams & Wilkins, 1925. 460 p. (Lotka A. Dzh. *Elementy fizicheskoj 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 osobej v vidah zhitvnyh, 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 mikrobnih 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)).

Формирование и расчёт математической модели конкуренции организмов

1. Цель моделирования

Математическая модель разработана для демонстрации того, как в среде с ограниченными ресурсами выживает наиболее энергоэффективный организм. Модель имитирует конкуренцию пяти типов организмов за ограниченный запас энергии, учитывая их энергоёмкость, трофические взаимодействия и способность к восстановлению.

2. Исходные данные и допущения

- Начальный запас энергии системы: 250 условных единиц.
- Количество типов организмов: 5.
- Энергоёмкость организмов (количество энергии, необходимое для поддержания одной особи):
 - организм 1: 2 ед.;
 - организм 2: 5 ед.;
 - организм 3: 7 ед.;
 - организм 4: 10 ед.;
 - организм 5: 15 ед.

Ключевые допущения модели

1. Организмы 1 и 2 могут выживать при минимальном количестве пищи или его отсутствии, но расти только при наличии достаточного ресурса.
2. Организмы 3, 4 и 5 не выживают без постоянного притока энергии.
3. При недостатке пищи организмы 3–5 начинают потреблять организмы 1 и 2.
4. При передаче энергии между трофическими уровнями действует **правило 10 %**: потребитель усваивает только 10 % энергии съеденной биомассы.
5. Неизрасходованная энергия накапливается в виде **энергетического остатка**, который используется для поддержания жизни до следующего цикла.
6. После полного исчезновения всех организмов система восстанавливается за счёт накопленных остатков, начиная с самых энергоэффективных видов.

3. Алгоритм расчёта

Шаг 1. Начальное распределение энергии

Начальный энергетический пул (250 ед.) делится поровну между всеми организмами: $250 / 5 = 50$ ед. на каждый тип.

Затем для каждого типа вычисляется начальная численность популяции путём деления выделенной энергии на энергоёмкость особи. Дробная часть отбрасывается и формирует начальный энергетический остаток.

Пример расчёта для организма 1: $50 / 2 = 25$ особей.

Шаг 2. Расчёт энергетического остатка

Энергетический остаток формируется из дробных частей при вычислении численности. Например, для организма 3: $50 / 7 \approx 7,14 \rightarrow 7$ особей, остаток = 0,14.

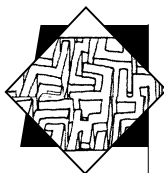
Шаг 3. Фаза конкуренции и трофических взаимодействий

При исчерпании начального ресурса начинается фаза конкуренции. Более требовательные организмы (3, 4, 5) поглощают менее энергоёмкие (1 и 2). Расчёт энергии, полученной от поглощения, ведётся по правилу 10 %. Эта энергия не увеличивает численность потребителя, а переходит в его энергетический остаток.

Пример поглощения организма 1 (2 ед.) Организмом 3: $2 \times 10 \% = 0,2$ ед. \rightarrow добавляется в остаток организма 3.

Шаг 4. Восстановление системы

После полного исчезновения всех организмов система восстанавливается за счёт суммарного энергетического остатка. Первыми восстанавливаются самые энергоэффективные



организмы (1 и 2), так как их низкая энергоёмкость позволяет создать максимальное количество особей из ограниченного остатка.

4. Пример расчёта по модели

Начальные условия:

- энергия: 250 ед.;
- организмы: 1 (2), 2 (5), 3 (7), 4 (10), 5 (15).

Расчёт начальной численности:

- организм 1: $50 / 2 = 25$;
- организм 2: $50 / 5 = 10$;
- организм 3: $50 / 7 \approx 7,14 \rightarrow 7$ (остаток 0,14);
- организм 4: $50 / 10 = 5$;
- организм 5: $50 / 15 \approx 3,33 \rightarrow 3$ (остаток 0,33).

Энергетический остаток на старте: $0,14 + 0,33 = 0,47$.

Динамика системы (последовательные состояния)

1. Начало: 1) 25, 2) 10, 3) 7, 4) 5, 5) 3.
3. После поглощения 1 и 2: 1) 0, 2) 0, 3) 7, 4) 5, 5) 3.
3. После поглощения 3: 1) 0, 2) 0, 3) 0, 4) 5, 5) 3.
4. Полное исчезновение: 1) 0, 2) 0, 3) 0, 4) 0, 5) 0.

Суммарный остаток: 9,5 ед.

5. Восстановление:

организм 1: $9,5 / 2 \approx 4,75 \rightarrow 4$ особи (остаток 0,75). Итог: 1) 4, 2) 0, 3) 0, 4) 0, 5) 0.

5. Выводы по модели

Модель демонстрирует, что в условиях ограниченных ресурсов выживают и восстанавливаются в первую очередь наиболее энергоэффективные организмы. Однако модель является линейной и не учитывает способность реальных экосистем к самоорганизации, созданию новых трофических связей и влиянию внешних факторов, что и было выявлено в ходе эксперимента.

Приложение 2

Исходные данные эксперимента

Таблица П.1.

Численность организмов на 7-й день эксперимента

Образец	Инфузории, экз.	Мал. инфузории, экз.	Водоросли, тыс. экз.	Бактерии, тыс. экз.	Микробактерии, тыс. экз.
1	250	640	3 975	3 456	973
2	230	620	4 672	2 752	896
3	250	760	3 776	3 648	940
4	60	560	5 312	2 986	846
5	180	480	5 568	2 354	864
6	160	540	5 376	2 674	826

Таблица П.2.

Численность организмов на 12-й день эксперимента

Образец	Инфузории, экз.	Мал. инфузории, экз.	Водоросли, тыс. экз.	Бактерии, тыс. экз.	Микробактерии, тыс. экз.
2	0	0	7 680	1 472	384
3	0	200	6 912	1 984	376
6	0	130	8 768	1 664	442

* Примечание: на 12-й день проводился выборочный контроль образцов 2, 3 и 6.

Численность организмов на 14-й день эксперимента

Образец	Инфузории, экз.	Мал. инфузории, экз.	Водоросли, тыс. экз.	Бактерии, тыс. экз.	Микробактерии, тыс. экз.	Другие наблюдения
1	720*	1 540	10 350	5 640	945	Большие и малые инфузории
2	720	1 680	10 560	5 470	375	–
3	720	1 080	11 550	5 670	165	Личинки круглых червей (285 тыс.)
4	360	2 920	10 500	4 350	255	Биоплёнки
5	480	2 520	12 510	6 240	240	Биоплёнки, круглые черви (120 экз.)
6	360	1 560	11 970	6 315	360	Биоплёнки

* Примечание: в образце 1 указаны отдельно «большие инфузории (120)» и «инфузории (600)», в таблице приведена суммарная численность.

Таблица П.4.

Численность организмов на 19-й день эксперимента

Образец	Инфузории, экз.	Мал. инфузории, экз.	Водоросли, тыс. экз.	Бактерии, тыс. экз.	Другие организмы
1	130	2 040	8 850	1 890	–
2	0	840	3 165	2 115	Эвглена зелёная (2 160 экз.)
3	0	4 350	3 685	1 125	Эвглена зелёная (885 тыс. экз.)
4	0	4 560	11 864	2 385	Коловратки (120 экз.)
5	0	5 340	11 445	2 200	Коловратки (120 экз.)
6	0	1 080	10 365	1 200	–

Условные обозначения и примечания:

экз. – количество особей;

тыс. экз. – тысячи особей.

В образцах 1–3 поддерживалась температура 19–22 °С, в образцах 4–6 – стабильная температура 22 ± 1 °С.

На 12-й день проводился выборочный контроль образцов 2, 3 и 6.

На 14-й день зафиксировано появление новых биологических форм: биоплёнки, круглые черви (нематоды), личинки червей.

На 19-й день в образцах 1–3 отмечена смена видового состава водорослей, появление эвглен зелёных; в образцах 4–6 появились коловратки.