

Место для баллов:

Код:

КАБИНЕТ № 3
ЭКОЛОГИЯ
(30 баллов)

Продолжительность выполнения задания – 1 час 30 минут (90 минут).

ЗАДАНИЕ 1

Расчет и интерпретация индексов биологического разнообразия (20 баллов)

Справочная информация для выполнения задания 1

Видовое разнообразие – очень важное свойство экосистем. С ним связана устойчивость систем к неблагоприятным факторам среды. Разнообразие обеспечивает как бы подстраховку, дублирование устойчивости. Вид, который присутствует в числе единичных экземпляров, при неблагоприятных условиях для широко представленного вида, в том числе и доминантного, может резко увеличить свою численность и, таким образом, заполнить освободившееся пространство (экологическую нишу), сохранив экосистему как единое целое.

Одним из широко используемых в практике экологических исследований индексов биологического разнообразия является индекс разнообразия Симпсона. Данный расчетный показатель отражает меру вероятности того, что две случайно выбранные особи будут принадлежать к одному и тому же виду. При анализе полученных результатов необходимо руководствоваться следующим подходом – чем меньше разнообразия, тем больше вероятность описанного выше события. Например, при отсутствии разнообразия (1 вид) вероятность того, что две случайно выбранные особи будут принадлежать к одному и тому же виду, окажется равна 1. Индекс Симпсона рассчитывается следующим образом:

$$D = \sum_{i=1}^n \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$$

где D – индекс разнообразия Симпсона,
 n_i — число особей вида i ,
N – общее число особей всех видов,
 n_i/N – доля особей вида i (p_i),
n = число видов в сообществе (видовое богатство).

Значение индекса Симпсона (D) может варьировать от 0 до 1, где 0 представляет бесконечное разнообразие, а 1 представляет отсутствие разнообразия.

Другим широко используемым индексом разнообразия, при расчете которого учитывают, как видовое богатство, так и видовую равномерность, является индекс разнообразия Шеннона-Винера. Данный индекс связан с концепцией неопределенности. Например, в случае, если сообщество имеет очень низкое

разнообразие, мы можем быть достаточно уверены в идентичности таксономической принадлежности организма, который мы можем выбрать случайным образом (высокая уверенность или низкая неопределенность). Если же сообщество очень разнообразно, и мы выбираем организм случайным образом, у нас есть большая неопределенность относительно того, какой вид мы выберем (низкая уверенность или высокая неопределенность). Индекс Шеннона-Винера рассчитывается следующим образом:

$$H' = - \sum_{i=1}^n (p_i \ln p_i)$$

где H' – индекс разнообразия Шеннона-Винера,
 p_i – доля особей i -го вида,
 $\ln p_i$ – натуральный логарифм p_i ,
 n – число видов в сообществе (видовое богатство).

Величина индекса H' в среднем колеблется от 1,5 до 3,5 и крайне редко превышает 4,5. Обратите внимание, что знак «–» в расчетном показателе индекса видового разнообразия Шеннона-Винера (H') не принимается во внимание (его не нужно учитывать).

Для оценки изучаемых сообществ исследователи часто прибегают к расчету показателей видовой выравненности в таковых. Индексы видовой выравненности отражают насколько близки по численности особи каждого вида в изучаемом сообществе. Так, если в изучаемом сообществе есть 10 особей Вида А и 1000 особей Вида Б – сообщество считается не равномерным. Напротив, в случае если в сообществе выявлено 10 особей Вида А и 12 особей Вида Б, сообщество является равномерным. Выравненность сообщества может быть представлена индексом выравненности Пиелу. Данный индекс рассчитывается по приведенной ниже формуле:

$$J = \frac{H'}{H'_{max}}$$

где J – индекс Пиелу,
 H' – индекс разнообразия Шеннона-Винера текущего сообщества,
 H'_{max} – максимальное значение индекса
разнообразия Шеннона-Винера в ряду сравниваемых сообществ.

Максимальный индекс Шеннона (H'_{max}) достигается тогда, когда все виды в сообществе имеют абсолютно одинаковую численность. В этом случае доля каждого вида p_i будет равна $1/S$, где S – общее число видов в сообществе. Максимальный индекс Шеннона равен натуральному логарифму от числа видов:

$$H'_{max} = \ln(S)$$

Значение J может варьировать от 0 до 1. Более высокие значения указывают на более высокие уровни равномерности (видовой выравненности). При максимальной равномерности $J = 1$. Индекс Пиелу (J) можно использовать в качестве мер доминирования видов (противоположность разнообразию) в сообществе. Низкое значение J указывает на то, что в сообществе доминирует 1 или несколько видов.

Условие задания 1

Учёные изучали динамику лугового сообщества после пожара, произошедшего 5 лет назад. Было проведено количественное определение численности растений по видам и смешанным таксономическим группам (на 1 м²) на двух модельных участках А – 1 год после пожара и Б – 5 лет после пожара (Рисунок 1). Результаты проведенных исследований представлены в таблице 1.



а – Растительное сообщество на модельном участке А (1 год после пожара)
б – Растительное сообщество на модельном участке Б (5 лет после пожара)

Рисунок 1 – Растительные сообщества модельных участков

Таблица 1. Результаты исследований структуры растительных сообществ на модельных участках А и Б (приведена численность экземпляров растений (на 1 м²))

Вид / смешанная таксономическая группа	Видовой код	Участок А	Участок Б
Овсяница луговая (<i>Festuca pratensis</i>)	Fp	20	45
Тимофеевка луговая (<i>Phleum pratense</i>)	Pt	15	40
Клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i>)	Tr	5	25
Подорожник большой (<i>Plantago major</i>)	Pm	30	10
Одуванчик лекарственный (<i>Taraxacum officinale</i>)	To	25	15
Пырей ползучий (<i>Elytrigia repens</i>)	Er	40	20
Тысячелистник обыкновенный (<i>Achillea millefolium</i>)	Am	5	20
Мхи (смешанная таксономическая группа)	B	10	35

Экологическая характеристика видов и смешанных таксономических групп, зарегистрированных в составе растительных сообществ модельных участков А и Б приведена в таблице 2.

Таблица 2. Экологическая характеристика видов, зарегистрированных в составе растительных сообществ модельных участков А и Б

Видовой код	Отношение к влаге	Отношение к свету	Отношение к плодородию почвы	Репродуктивные и жизненные стратегии	Роль в сукцессии
Fp	Мезофит	Гелиофит	Мезотроф	К-стратег Виолент (конкурент)	Позднесукцессионный вид
Pt	Мезофит	Гелиофит	Мезотроф	К-стратег Виолент (конкурент)	Позднесукцессионный вид
Tr	Мезофит	Гелиофит	Мезотроф (Азотфиксатор)	Смешанная (конкурент)	Вид эдификатор
Pm	Мезофит	Гелиофит	Эвтроф	г-стратег / Эксплерент (рудерал)	Пионерный вид
To	Мезофит	Гелиофит	Эвтроф	г-стратег / Эксплерент (рудерал)	Пионерный вид
Eg	Мезофит	Гелиофит	Мезотроф	г-К переходный / Агрессивный эксплерент	Ранний агрессивный колонизатор
Am	Ксеромезофит	Гелиофит	Олиготроф	К-стратег / Пациент (стресс-толерант)	Среднесукцессионный вид
B	Гигрофиты	Сциогелиофиты	Олиготрофы	г-стратегии (при расселении), К-стратегии (при удержании территории) / Пациенты (стресс-толерант)	Ранний колонизатор

Примечание:

Мезофит – растение среднеувлажнённых местообитаний; Ксеромезофит – растение, промежуточное между мезофитами и ксерофитами, предпочитает умеренное увлажнение, но способно переносить засуху; Гигрофит – растение сильно увлажнённых местообитаний. Гелиофит – светлюбивое растение; Сциогелиофит – теневыносливое растение, может расти в тени, но лучше развивается при полном освещении. Олиготроф – растения бедных почв; Мезотроф – растения умеренно плодородных почв; Эвтроф – растения плодородных почв.

На основе имеющихся данных и приведенной выше информации решите следующие задачи:

1.1 Для каждого участка рассчитайте: показатель общей численности (N); Индекс Шеннона-Винера (H'); Индекс выравненности Пielу (J); Индекс доминирования Симпсона (D). Итоговое значение рассчитываемых индексов D и J округлите до тысячных, H' – до сотых.

Таблица для ответов на задание 1.1 (4 балла – по 0,5 за каждый верный)

Показатель	Участок А	Участок Б
Общая численность (N)	150	210
Индекс Шеннона-Винера (H')	1,88	1,98
Индекс выравненности Пielу (J)	0,904	0,952
Индекс доминирования Симпсона (D)	0,174	0,149

1.2 Сравните биоразнообразие и структуру сообществ на участках А и В. Опишите, какие экологические процессы могли привести к этим изменениям.

1.2.1 Мы наблюдаем пример	вторичной сукцессии	0,25 б.
движущей силой которой является	межвидовая конкуренция за ресурсы	0,25 б.

1.2.2 Опираясь на данные таблиц 1 и 2 заполните пропуски:

Участок А

характеризуется	ранней / пионерной	стадией	сукцессии	(0,5 балла)
Через год после пожара территория участка представляет собой	открытое, хорошо освещенное пространство			(0,25 балла)
Это создает идеальные условия для	гелиофитов			(0,25 балла)
играющих роль	пионеров (r-стратегов)			(0,25 балла)
В структуре сформировавшегося растительного сообщества участка А				
доминирует	пырей ползучий (E. repens) – 40 экземпляров			(0,25 балла)
Также многочисленны	подорожник большой (P. major) – 30 и одуванчик лекарственный (T. officinale) – 25			(0,5 балла)
являющиеся типичными	эвтрофами			(0,25 балла)
хорошо растущими на почвах, обогащенных	зольными элементами после пожара.			(0,25 балла)

Участок Б

характеризуется	средней	стадией	сукцессии	(0,5 балла)
Через 5 лет после пожара среда изменяется. Почва начинает	восстанавливаться			
а разросшиеся растения	создают конкуренцию за свет			(0,5 балла)
Происходит вытеснение пионерных видов более конкурентоспособными	позднесукцессионными видами (К-стратегами)			(0,25 балла)
Резко возрастает численность	типичных луговых злаков – овсяницы луговой (F. pratensis – 45) и тимopheевки луговой (Ph. pratense – 40).			(0,25 балла)
Которые являясь	мезотрофами	формируют	плотный травостой.	
Последний в свою очередь	затеняет	почву		(0,75 балла)

Ключевую роль в растительном сообществе участка Б играет

клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i>) – 25 экземпляров на м ²	(0,25 балла)
Который выполняет роль эдификатора (средообразователя)	(0,25 балла)
Будучи азотфиксатором данный вид	(0,25 балла)
обогащает почву азотом	(0,5 балла)
создавая благоприятные условия для более требовательных	
мезотрофов	(0,25 балла)
Увеличение численности мхов	(0,25 балла)
которые являются сциогелиофитами (теневыносливыми),	(0,25 балла)
также свидетельствует о формировании более сомкнутого травостоя	
и затенения поверхности почвы.	(0,25 балла)

1.3 Сравните сообщества модельных участков на основании произведенных Вами в ходе выполнения задания 1.1 вычислений (Общая численность N; Индексы биологического разнообразия H', J, D).

Ответ (2,5 балла):

Общая численность (N) возросла, что говорит о росте продуктивности растительного сообщества (биомасса и плотность растительного сообщества возросли).

Разнообразие (Индекс Шеннона (H')) по прошествии 5 лет после пожара увеличилось (Участок А – 1,88; Участок Б – 1,98).

Сформировавшиеся после пожара растительные сообщества модельных участков с ходом времени становятся более выровненными, о чем свидетельствует увеличение соответствующего индекса (Индекса выравненности Пielу (J): 0,904 и 0,952 для участков А и Б, соответственно).

Снижение индекса доминирования (Индекс Симпсона (D)) с 0,173 для участка А, до 0,149 для участка Б свидетельствует о снижении роли отдельных доминирующих видов.

1.4 Сформулируйте вывод на основании всей имеющейся информации

Ответ (2 балла):

Через 1 год после пожара (участок А) в структуре растительного лугового сообщества доминировали быстрорастущие, стрессоустойчивые виды, такие как *Elytrigia repens*, *Plantago major*, *Taraxacum officinale*.

Через 5 лет (участок Б) увеличилась доля устойчивых видов (*Festuca pratensis*, *Phleum pratense*, *Trifolium pratense*, мхи).

Повысилась равномерность, т.е. сообщество стало более устойчивым и зрелым, типичный переход от первичной (ранней / пионерной) фазы сукцессии к средней (промежуточной).

Сукцессия идет по пути смены доминантов от светолюбивых гелиофитов), быстрорастущих пионеров (r-стратегов) к более (конкурентоспособным видам установившихся сообществ (K-стратегам). Этот процесс сопровождается изменением самой среды (эдификаторная роль клевера) и усложнением структуры сообщества

1.5 Предположим, что через 10 лет после пожара общая численность растений достигает 250 экземпляров/м², доли *Trifolium pratense*, *Festuca pratensis* и *Phleum pratense* составляют по 20 % каждая, а доля каждого из остальных пяти представителей сообщества – по 8 %.

1.5.1 Рассчитайте прогнозируемый индекс Шеннона. Ответ укажите с точностью до сотых.

Ответ:

Прогнозируемый индекс Шеннона (H'):	1,98	(2 балла)
-------------------------------------	------	-----------

1.5.2 На основе прогнозируемого индекса Шеннона сделайте вывод о сукцессионной стадии сообщества.

Ответ:

<i>Прогнозируемый индекс Шеннона на 10-й год (1,98) практически не отличается от значения на 5-й год. Это указывает на то, что сукцессия значительно замедлилась и сообщество достигло состояния относительной стабильности близкого к климаксовому (для данного типа экосистемы).</i>	
	(2 балла)

ЗАДАНИЕ 2

Анализ динамики системы «хищник-жертва» в условиях искусственной экосистемы (10 баллов)

Справочная информация для выполнения задания 2

Модель Лотки-Вольтерры является краеугольным камнем в математическом описании динамических взаимоотношений между популяциями хищника и жертвы. Разработанная независимо Альфредом Лоткой и Вито Вольтеррой в начале XX века, она представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, постулирующих следующие упрощающие допущения:

1. **Неограниченный рост жертвы:** В отсутствие хищника популяция жертвы демонстрирует экспоненциальный рост.
2. **Специфичность пищевых связей:** Хищник питается исключительно данным видом жертвы, и его выживание полностью зависит от её доступности.
3. **Линейная функциональная реакция:** Темп потребления жертв хищником пропорционален произведению численности хищника и жертвы (предполагаются случайные, неограниченные встречи).

4. **Отсутствие внутривидовой конкуренции:** Плотность популяций не ограничивается конкуренцией за ресурсы внутри видов.
5. **Однородность среды:** Пространственное распределение особей и ресурсов не учитывается.
6. **Отсутствие других факторов:** Модель не учитывает убежища, миграцию, изменения абиотических факторов среды, генетические изменения и другие сложные взаимодействия.

Несмотря на свои упрощения, модель позволяет выявить фундаментальные механизмы, лежащие в основе циклических колебаний численности, характерных для многих систем "хищник-жертва". Система дифференциальных уравнений выглядит следующим образом:

$$\frac{dx}{dt} = (\alpha - \beta y)x$$

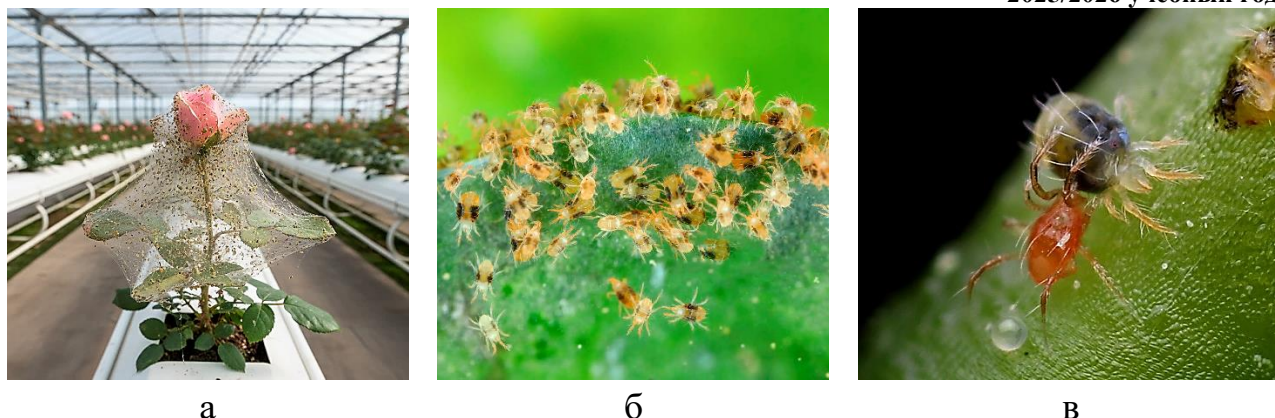
$$\frac{dy}{dt} = (\delta x - \gamma)y$$

где x – численность популяции жертвы,
 y – численность популяции хищника, t – время,
 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – коэффициенты, отражающие взаимодействия между видами.

Условие задания 2

Крупный тепличный комплекс, специализирующийся на выращивании роз на срезку, столкнулся с персистентной проблемой массового размножения обыкновенного паутинного клеща (*Tetranychus urticae*). Этот полифаг является одним из наиболее значимых вредителей в защищенном грунте, способным вызывать хлороз, некроз листьев и существенное снижение товарных качеств производимой продукции, приводя к значительным экономическим потерям. В условиях строгого регулирования применения химических пестицидов и требований к экологической чистоте продукции, агрономы комплекса приняли решение об имплементации стратегии биологического контроля. В качестве биоагента был интродуцирован специализированный акарифаг – хищный клещ фитосейулюс (*Phytoseiulus persimilis*) (Рисунок 2).

Научная группа, в состав которой входите и Вы, приступила к мониторингу данной ситуации. Первоочередная задача группы состояла в сборе эмпирических данных для детального анализа динамики популяций *T. urticae* и *P. persimilis* в условиях интенсивного тепличного агроценоза. На протяжении 24 недель проводился еженедельный количественный учет средней численности обоих видов на стандартной площади листовой поверхности розы. Полученные данные критически важны для оптимизации протоколов интродукции *P. persimilis* и поддержания стабильного биологического равновесия, предотвращая экономически значимые вспышки *T. urticae*.



а – Культура розы (*Rosa sp.*) в условиях защищенного грунта;
б – Агрегация паутинного клеща (*Tetranychus urticae*) на листе розы;
в – Хищный клещ фитосейулюс (*Phytoseiulus persimilis*) в процессе питания.
Рисунок 2 – Объекты исследования в системе биологического контроля тепличного агроценоза

Ниже представлена таблица 3, содержащая данные по средней численности паутинного клеща (N, особей на лист) и хищного клеща *P. persimilis* (P, особей на лист) в течение 24 недель эксперимента.

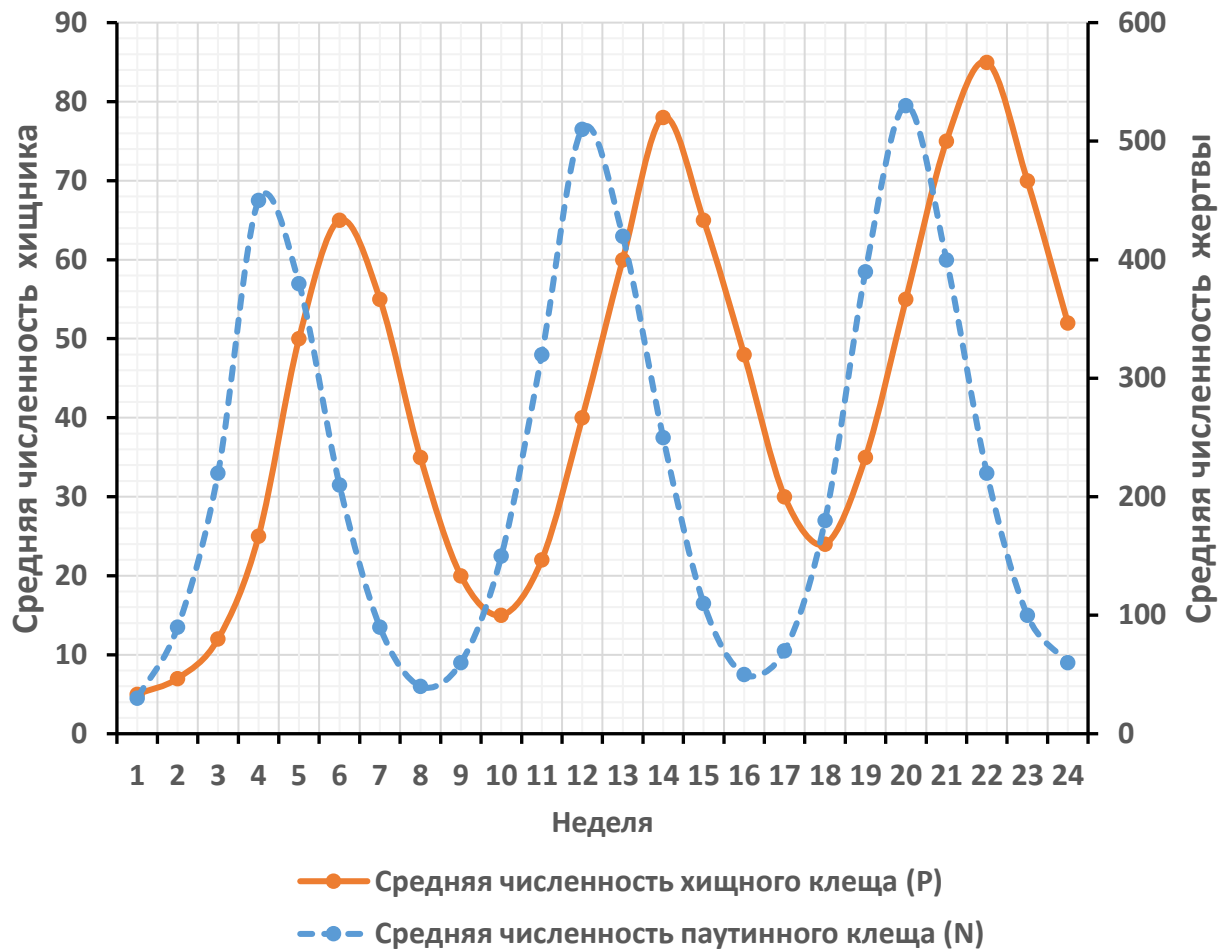
Таблица 3. Динамика численности паутинного клеща и хищного клеща в условиях модельного тепличного агроценоза

Неделя	Средняя численность паутинного клеща (N)	Средняя численность хищного клеща (P)
1	30	5
2	90	7
3	220	12
4	450	25
5	380	50
6	210	65
7	90	55
8	40	35
9	60	20
10	150	15
11	320	22
12	510	40
13	420	60
14	250	78
15	110	65
16	50	48
17	70	30
18	180	24
19	390	35
20	530	55
21	400	75
22	220	85
23	100	70
24	60	52

2.1 Постройте точно линейный график, отражающий динамику численности популяций *T. urticae* и *P. persimilis* во времени.

- Ось абсцисс (X): Время (недели).
- Ось ординат (Y): Средняя численность на лист жертв и хищников.
- Используйте разные типы линий (сплошная и пунктирная) для популяций жертвы и хищника.
- Обязательно подпишите оси, укажите единицы измерения и создайте легенду для графика.

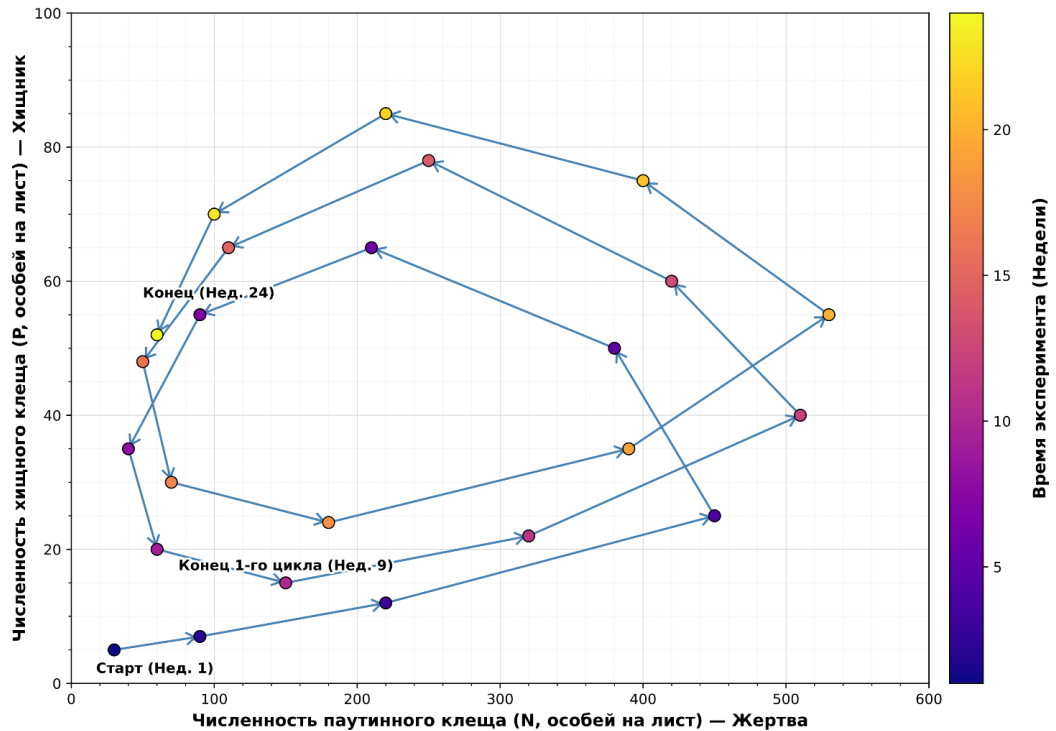
Ответ (3 балла):



2.2 Графики временной динамики (которые Вы построили в задании 2.1) показывают изменение численности во времени. Однако для глубокого анализа устойчивости системы экологии часто используют «фазовые диаграммы», где по осям отложены численности популяций хищника и жертвы.

Постройте фазовую траекторию для всего периода исследований (с 1-й по 24-ю неделю включительно). Соедините точки стрелками, указывающими направление времени.

Ответ (3 балла):



2.3 Используя уравнение для жертвы и данные таблицы, оцените биотический потенциал (коэффициент мгновенного роста) паутиного клеща (α). Для оценки α выберите интервал времени в начале эксперимента, когда влиянием хищника можно пренебречь (численность P минимальна и близка к 0, а рост N близок к экспоненциальному). Используйте данные за 1-ю и 2-ю недели. Для дискретных данных производную dx/dt можно заменить на $\Delta x/\Delta t$.

2.3.1 Рассчитайте скорость изменения численности жертвы $\Delta N/\Delta t$ за первую неделю.

2.3.2 Рассчитайте среднюю численность жертвы N_{avg} на этом интервале.

2.3.3 Вычислите α (ответ округлите до десятых).

Ход решения (2 балла):

$\Delta N = N_2 - N_1 = 90 - 30 = 60$ особей.
 $\Delta t = 1$ неделя.
 Средняя численность N на интервале: Можно брать N_1 (30) для упрощения или среднее арифметическое $(30+90) / 2 = 60$
 Вариант А (через N_1): $1/N_1 * \Delta N/\Delta t = 60/30 = 2,0$
 Вариант Б (через N_{avg}): $1/N_{avg} * \Delta N/\Delta t = 60/60 = 1,0$
 Вариант В (через логарифмы – точнее для экспоненты):
 $r = \ln(N_2) - \ln(N_1) = \ln(90) - \ln(30) = \ln(3) \approx 1,1$
 Поскольку P мало (5–7 особей), членом βP пренебрегаем или считаем его очень малым.

Ответ:

Значения в диапазоне 1,0 – 2,0 (при наличии обоснованного расчета)

0,25 б.

2.4 Взгляните на график, построенный в задании 2.1. Определите среднюю величину временного лага (задержки) реакции хищника на изменение численности жертвы. Ответ укажите в неделях.

Ответ:

Пики жертвы	4, 12, 20	(1 балл)
Пики хищника	6, 14, 22	
Временной лаг	2 недели	

2.5 Агрономы установили экономический порог вредоносности для *T. urticae* на уровне 400 особей на лист. При любом превышении этого порога более чем на 1 неделю розам наносится непоправимый ущерб.

Основываясь на ваших данных:

2.5.1 Удалось ли интродуцированному хищнику *P. persimilis* удерживать вредителя ниже ЭПВ на протяжении всего эксперимента?

Ответ:

Нет	(0,25 балла)
-----	--------------

2.5.2 Укажите временные интервалы (недели), когда применение *P. persimilis* оказалось недостаточным и требовалась коррекция (химобработка или дополнительный выпуск).

Ответ:

Временные интервалы	1—Неделя 4 (450)	(0,5 балла)
	2 – Недели 12–13 (510, 420)	
	3—Недели 20–21 (530, 400)	