

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Техносферная безопасность»

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
20.03.01 «Техносферная безопасность»
очной формы обучения*



Могилев 2026

УДК 574
ББК 28.08 |
О75

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Техносферная безопасность» «29» апреля 2026 г.,
протокол № 9

Составитель канд. биол. наук, доц. Н. Н. Казачёнок

Рецензент канд. техн. наук, доц. О. В. Голушкова

Методические рекомендации к лабораторным работам содержат основные теоретические положения по теме, методику выполнения лабораторных работ, варианты заданий. Предназначены для студентов направления подготовки 20.03.01 «Техносферная безопасность» очной формы обучения.

Учебное издание

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ

Ответственный за выпуск

А. В. Щур

Корректор

И. В. Голубцова

Компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2026

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Определение степени антропогенных воздействий на литосферу, атмосферу.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Расчет основных показателей сообществ....	12
3 Лабораторная работа № 3. Оценка состояния окружающей среды по обилию и разнообразию лишайников.	16
4 Лабораторная работа № 4. Компьютерное моделирование эпидемического процесса.....	20
5 Лабораторная работа № 5. Экспоненциальная и логистическая кривые роста популяции. Уравнение Ферхюльста – Пирла	26
6 Лабораторная работа № 6. Построение сукцессионных рядов биомов умеренного пояса.....	29
7 Практическая работа № 7. Построение диаграмм потока энергии в экосистемах	34
8 Практическая работа № 8. Оценка видового разнообразия древесной растительности парка (университетской территории)	40
Список литературы	43

Введение

Познание окружающего мира – естественная потребность живого существа и источник интеллектуального наслаждения для существа разумного. Даже примитивный живой организм не накапливает бесполезной информации. Сначала на генном, затем на рефлекторном уровне закладывается система регулирования взаимоотношений индивида с окружающей средой. С помощью морфологических изменений, физиологических и поведенческих реакций происходит адаптация вида, популяции, особи к миру. В результате вид становится узкоспециализированным: реакции, отработанные в данных конкретных условиях, при изменении ситуации в непрерывно эволюционирующей среде становятся неадекватными. Чем лучше адаптирован вид, тем ближе его вымирание.

Разумное существо, напротив, стремится адаптировать окружающий мир к своему анатомически и физиологически реликтовому организму. Жизнестойкость такого вида может быть практически неограниченной. В эволюционном тупике узкой специализации оказывается сама адаптируемая окружающая среда.

Биологические потребности человека не превышают потребностей животного средних размеров. Социальные потребности можно условно разделить на «потребности развивающегося сознания» и «прихоти иерархического статуса в стае». Эволюция социальных потребностей, эволюция сознания определит дальнейшую судьбу планеты и того сектора Метагалактики, на который мы успеем распространить наше адаптирующее влияние.

Учебный курс «Общая экология» формирует знания по основным направлениям современной фундаментальной экологии, дает представление о ведущих научных понятиях и концепциях, взаимосвязи и взаимообусловленности явлений в биосфере, закономерностях взаимодействия живых организмов с экологическими факторами, включая антропогенные. Данный курс направлен на формирование у студентов системных естественнонаучных представлений об экологических закономерностях существования особей, популяций и сообществ живых организмов, умения применять теоретические знания для решения природоохранных проблем.

Практическая часть курса выполняет следующие задачи.

Студент должен уметь анализировать состояние среды обитания человека, прогнозировать динамику изменения её состояния в результате природных факторов и антропогенного воздействия, оценивать и выбирать методы защиты окружающей среды применительно к сфере своей профессиональной деятельности и способы обеспечения благоприятных условий жизнедеятельности человека, а также владеть понятийно-терминологическим аппаратом в области экологии.

1 Лабораторная работа № 1. Определение степени антропогенных воздействий на литосферу, атмосферу

Цель работы: изучить методики оценки качества воздуха и закисления осадков, выпадающих на почву.

Теоретическая часть

1.1 Природное и антропогенное воздействие на атмосферу.

Атмосфера – это газовая оболочка Земли. Важнейшие климатические и экологические особенности Земли в значительной степени определяются наличием и свойствами атмосферы. Основными компонентами атмосферного воздуха являются азот (78,084 %) и кислород (20,946 %). На долю остальных газов приходится менее 1 %, в том числе аргона – 0,934 %, углекислого газа – 0,03 %, водорода, неона, гелия, криптона, метана – 0,009 %.

Под загрязнением атмосферы понимают изменение ее состава при поступлении примесей естественного или антропогенного происхождения. Источником природных примесей являются ядро планеты (водород), мантия (радон, выбросы действующих вулканов и гейзеров) океан (микрористаллы солей), литосфера (газообразные продукты разложения органических веществ) и др. Под влиянием природных процессов формируется фоновое загрязнение атмосферы, которое может привести к вымиранию значительной части живых организмов или дать толчок к их эволюционному преобразованию и развитию. Так, «изобретение» оксигенного фотосинтеза привело к накоплению в атмосфере кислорода, токсичного для первых обитателей планеты, вымиранию анаэробной биоты и формированию аэробных организмов. Природное изменение состава атмосферы чаще всего бывает либо очень постепенным, в течение геологического времени, либо резким, но локальным. Оно сопровождается заменой видового состава биоты вследствие либо эволюции, либо миграции.

Геологи и палеонтологи насчитывают пять Великих вымираний (не считая самого первого, связанного с оксигенным фотосинтезом). Около 440 млн лет назад движение и столкновение континентов привело к образованию горных цепей. В процессе гипергенеза («выветривания») обнажившихся минералов из атмосферы поглощались кислород и углекислый газ. Считают, что в этот период исчезло около 85 % всех существовавших видов живых организмов. Ещё через 70 млн лет вымерло около 75 % видов. Это связывают с вулканическими выбросами, падением содержания кислорода и другими причинами. Наиболее известно Великое вымирание на рубеже пермского и триасового периодов около 252 млн лет назад. Причина – вулканическая активность и выброс вулканических газов и пепла. Вымерло до 96 % морских видов и примерно 75 % наземных. Через 50 млн лет вулканы погубили ещё 80 % видов. 66 млн лет назад 75 % видов, в том числе почти всех динозавров, убили астероид и выброшенные в атмосферу пыль и соединения серы.

Таким образом, природные процессы изменяют состав атмосферы регу-

лярно и вызывают очень тяжелые последствия для существующих видов. Но одновременно они способствуют быстрому эволюционному развитию биосферы.

Техногенное загрязнение атмосферы на современном этапе развития человечества гораздо меньше и почти всегда локально. Загрязнение атмосферных осадков выбросами металлургических предприятий можно обнаружить на расстоянии 5...10 км. Порядка сотен километров – влияние кислотообразующих ангидридов серы и азота (кислотные дожди).

На глобальном уровне можно рассматривать только стратосферные выпадения долгоживущих радионуклидов, в частности трития. Некоторые специалисты настаивают на глобальном влиянии «парниковых газов», однако их утверждения встречают всё более скептические оценки.

Тем не менее техногенное загрязнение атмосферного воздуха способно оказать существенное влияние на здоровье и продолжительность жизни людей. Именно потому, что выбросы загрязняющих веществ локальны и происходят на территории городов или в пригородной «промзоне», концентрация этих веществ может быть достаточно высокой, чтобы вызвать массовые заболевания, а в некоторых случаях и смерти. В 1952 г. в Лондоне смог стал причиной смерти около 12 тыс. человек, а в 1962 г. от смога погибло 750 жителей Лондона. Особенно опасны аварийные выбросы. В 1984 г. в индийском городе Бхопал произошёл аварийный выброс 42 т метилизоцианата. Число жертв точно не определено. По разным оценкам оно составило 18...20 тыс. человек. Количество пострадавших – более 570 тыс.

1.2 Методы оценки качества атмосферного воздуха.

Вещества-загрязнители атмосферы (загрязняющие вещества – ЗВ) могут находиться в трех агрегатных состояниях: газ, пыль (аэрозоль дезинтеграции), дым или туман (аэрозоль конденсации). Наиболее распространенными загрязняющими веществами атмосферы являются оксид углерода, диоксиды серы и азота, пыль. Состав выбросов предприятия различается в зависимости от характера производства и применяемого сырья. При использовании топлива, которое сжигается в котельных, на факелах, в топках печей, в двигателях автомобилей и др., в атмосферу выбрасываются оксид углерода (CO), оксиды азота (NO, NO₂, N₂O₅), бенз(а)пирен и др. При сжигании серосодержащего топлива выделяются оксиды серы (SO₂, SO₃).

Кислотообразующие компоненты атмосферных загрязнений (NO₂, CO₂, SO₂), соединяясь с водой, выпадают на поверхность почвы и водоёмов в виде кислотных дождей.

Для предупреждения неблагоприятного воздействия атмосферных загрязнений на человека, животных и растительный мир для всех токсичных компонентов установлены предельно допустимые концентрации (ПДК).

Предельно допустимая концентрация (ПДК) примеси в атмосфере – это максимальная концентрация примеси в атмосфере, отнесенная к определенному времени осреднения, которая при периодическом воздействии или на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного воздействия, включая отдаленные последствия, и на окружающую среду в целом.

В настоящее время используется несколько видов ПДК:

– в зависимости от периода осреднения выделяют:

а) максимальная разовая (ПДК_{м.р.}) – это максимальная концентрация примеси в атмосфере, определяемая по пробе, отобранной за 20...30-минутный интервал времени;

б) среднесуточная (ПДК_{с.с.}) – это концентрация примеси в атмосфере, отбираемая по среднесуточной пробе, которая представляет собой пробу воздуха, отбираемую в течение 24 ч непрерывно либо с равными интервалами, но не менее 4-х раз в сутки;

в) среднемесячная – это концентрация примеси в атмосфере, определяемая как среднее значение среднесуточных или максимально разовых концентраций, измеряемых не менее 20 дней в месяц;

г) среднегодовая – это концентрация примеси в атмосфере, определяемая как среднее значение среднесуточных или максимально разовых концентраций, измеряемых не менее 200 дней в год;

– в зависимости от реципиентов выделяют:

а) предельно допустимая концентрация для воздуха населенных мест (ПДК_{а.в.});

б) предельно допустимая концентрация для воздуха рабочей зоны (ПДК_{р.з.}).

В случае отсутствия значений ПДК применяются ориентировочно безопасные уровни воздействия (ОБУВ).

Величина ПДК зависит от степени токсичности вещества (его пороговой дозы), способности накапливаться (коэффициента кумуляции), механизма действия (канцерогенные и мутагенные вещества имеют больший коэффициент запаса) и других параметров.

При наличии в атмосферном воздухе нескольких ЗВ рассчитывается коэффициент комбинированного действия (ККД). ККД отражает характер воздействия одновременно присутствующих в атмосферном воздухе ЗВ, который может проявляться по типу суммации неблагоприятных эффектов воздействия каждого из ЗВ, нейтрализации или потенцирования.

ККД рассчитывается по формуле

$$\text{ККД} = \sum (C_i / \text{ПДК}_i),$$

где C_i – концентрация i ЗВ в воздухе.

Для большинства ЗВ в атмосферном воздухе населённых пунктов принято, что нормативное качество воздуха соблюдается и риск повышения заболеваемости отсутствует, если:

- ККД < 2 (при $2 \leq i \leq 4$);
- ККД < 3 (при $5 \leq i \leq 9$);
- ККД < 4 (при $10 \leq i \leq 20$);
- ККД < 5 (при $i > 20$),

где i – количество загрязняющих веществ.

Опасность вещества зависит не только от его токсичности, но и от физико-

химических свойств, определяющих условия поступления в организм (растворимость в воде и маслах, агрегатное состояние, температура кипения) и других параметров. В результате получается интегральная характеристика вещества, которая называется классом опасности.

Выделяют четыре класса опасности:

- 1) I класс – чрезвычайно опасные ($\text{ПДК}_{\text{р.з.}} < 0,01 \text{ мг/м}^3$);
- 2) II класс – высокоопасные ($0,01 < \text{ПДК}_{\text{р.з.}} < 0,1 \text{ мг/м}^3$);
- 3) III класс – умеренно опасные ($0,1 < \text{ПДК}_{\text{р.з.}} < 1 \text{ мг/м}^3$);
- 4) IV класс – малоопасные ($\text{ПДК}_{\text{р.з.}} > 1 \text{ мг/м}^3$).

Понятно, что превышение концентрации чрезвычайно опасного вещества приводит к более тяжелым последствиям, чем малоопасного. Поэтому в качестве комплексного показателя уровня загрязнения атмосферного воздуха используется индекс загрязнения атмосферы (ИЗА), учитывающий классы опасности ЗВ. ИЗА рассчитывается для приоритетных примесей, устанавливаемых для каждого населенного пункта индивидуально. ИЗА используют формулу

$$\text{ККД} = \sum (C_i \cdot K_i / \text{ПДК}_i),$$

где K_i – коэффициент, равный 0,85; 1,0; 1,3 и 1,7 соответственно для IV, III, II и I-го классов опасности.

В зависимости от значения ИЗА выделяют уровни загрязнения атмосферы: чрезвычайно высокий ($\text{ИЗА} > 8$), высокий ($5 < \text{ИЗА} < 8$), средний ($3,5 < \text{ИЗА} < 5$), низкий ($\text{ИЗА} < 3,5$).

1.3 Оценка кислотности осадков, выпадающих на поверхность почвы и водоёмов.

В естественных условиях атмосферные осадки обычно имеют нейтральную ($\text{pH} \approx 7$) или слабокислую ($\text{pH} = 5,6$) реакцию. Это происходит из-за того, что содержащиеся в атмосфере углекислый газ и оксиды азота природного происхождения вступают в реакцию с дождевой водой.

Кислотными считают такие осадки, pH которых не выше 5. Они образуются чаще всего при сжигании топлива, содержащего серу и азот. Оксиды серы и азота при взаимодействии с атмосферной, гидросферной или почвенной водой образуют серную, азотную и другие кислоты. Источниками антропогенных кислотных осадков являются также некоторые технологические процессы в металлургии, нефтехимической промышленности, на транспорте.

В поступлении на территорию Беларуси серы и окисленного азота основная доля принадлежит странам соседям – Польше, Германии, Украине. Средняя кислотность осадков в Беларуси колеблется от 5,1 до 6,2.

Выделяют три стадии воздействия кислотных дождей на водоёмы:

- 1) с увеличением кислотности воды ($\text{pH} < 7$) водяные растения начинают погибать, лишая других животных водоёма пищи, уменьшается количество кислорода в воде, начинают бурно развиваться водоросли (буро-зеленые). Первая стадия эвтрофикации (заболачивания) водоема. При кислотности $\text{pH} = 6$ погибают пресноводные креветки;

2) кислотность повышается до $\text{pH} = 5,5$, погибают донные бактерии, которые разлагают органические вещества и листья, и органический мусор начинает скапливаться на дне. Затем гибнет планктон – крошечное животное, которое составляет основу пищевой цепи водоема и питается веществами, образующимися при разложении бактериями органических веществ;

3) кислотность достигает $\text{pH} 4,5$, погибает вся рыба, большинство лягушек и насекомых.

Таким образом, основные последствия кислотных дождей:

- гибель флоры и фауны в водоемах;
- снижение урожайности;
- деградация лесов (усыхание хвойных лесов и дубрав);
- растворение тяжелых металлов (кадмий, ртуть, свинец) и попадание их в пищевые цепи.

Точное значение pH растворов, в том числе атмосферных осадков, определяют с помощью иономеров (pH -метров) (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Лабораторный pH -метр/ОВП-метр/термометр HI 5221-02

Электродная система прибора при погружении в контролируемый раствор развивает ЭДС, линейно зависящую от pH и температуры раствора.

Электролитический контакт комбинированного электрода с контролируемым раствором осуществляется с помощью электролитического ключа, обеспечивающего истечение насыщенного раствора хлористого калия KCl из полости электрода в анализируемый раствор. Раствор KCl , непрерывно просачиваясь через электролитический ключ, предотвращает проникновение из анализируемого раствора в систему комбинированного электрода посторонних ионов, которые могли бы изменить величину потенциала электрода.

ЭДС электродной системы преобразуется в аналого-цифровом преобразователе. В микропроцессоре происходит расчет значения pH и выводится на цифровое табло прибора.

Приблизительное значение pH при титровании, оценке кислотности почвы, осаждении некоторых соединений в аналитической химии и радиохимии определяют с помощью индикаторов – веществ, изменяющих свой цвет при определённых значениях pH. Некоторые индикаторы, например метиловый фиолетовый, имеют до трёх переходов цвета при изменении pH.

Практическое задание

1 Используя материалы таблиц 1.1 и 1.2, рассчитать значения ККД и ИЗА для своего варианта.

2 Сделать вывод об уровне загрязнения атмосферного воздуха и соблюдении санитарно-гигиенических нормативов.

Таблица 1.1 – Содержание загрязняющих веществ в воздухе города

Вариант	Пыль, мг/м ³	Диоксид серы, мг/м ³	Оксид углерода, мг/м ³	Диоксид азота, мг/м ³	Фенол, мг/м ³	Аммиак, мг/м ³	Формальдегид, мг/м ³	Свинец, мг/м ³
1	0,061	0,007	0,828	0,02	0,002	0,015	0,005	0,00004
2	0,033	0,004	1,2	0,019	0,001	0,009	0,008	0,00003
3	0,114	0,006	1,19	0,023	0,002	0,013	0,007	0,00001
4	0,082	0,005	0,52	0,008	0,002	0,011	0,006	0,00002
5	0,147	0,002	0,442	0,029	0,001	0,017	0,008	0,00002
6	0,019	0,002	1,126	0,036	0,003	0,047	0,004	0,00003
7	0,033	0,003	1,165	0,077	0,003	0,031	0,005	0,00001
8	0,196	0,009	0,59	0,02	0,002	0,008	0,007	0,00002
9	0,083	0,002	0,517	0,027	0,001	0,005	0,007	0,00007
10	0,085	0,007	1,08	0,03	0,003	0,012	0,007	0,00005
11	0,161	0,002	0,647	0,024	0,002	0,019	0,001	0,00002
12	0,122	0,002	0,572	0,035	0,001	0,017	0,007	0,00007
13	0,086	0,015	0,528	0,013	0,001	0,021	0,006	0,00005
14	0,101	0,004	0,384	0,021	0,002	0,016	0,004	0,00003
15	0,155	0,003	0,763	0,008	0,002	0,025	0,008	0,00001

Таблица 1.2 – Предельно допустимые среднесуточные концентрации ПДК_{с.с.} загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест

Вещество	ПДК _{с.с.} , мг/м ³
Аммиак	0,04
Диоксид азота	0,04
Диоксид серы	0,05
Оксид углерода	3
Пыль	0,15
Свинец	0,0003
Фенол	0,003
Формальдегид	0,003

3 Провести измерения проб воды и приготовленных растворов.

Порядок проведения измерений:

- 1) комбинированный измерительный электрод закрепить в штативе и подключить к гнезду ИЗМ;
- 2) автоматический термокомпенсатор закрепить в штативе и подключить к входу ТКА;
- 3) иономер включить в сеть и прогреть в течение 15 мин;
- 4) промыть электрод дистиллированной водой и удалить остатки воды фильтровальной бумагой;
- 5) промыть электрод измеряемым раствором;
- 6) погрузить электрод и термокомпенсатор в измеряемый раствор;
- 7) нажать клавишу СЕТЬ. На дисплее отражается значение рН раствора;
- 8) записать полученные значения в тетрадь;
- 9) сравнить результаты измерений с оптимальными значениями для различных биологических объектов.

Контрольные вопросы

- 1 В чем заключается цель санитарно-гигиенического нормирования?
- 2 Дайте определение ПДК.
- 3 Какие виды ПДК выделяют?
- 4 Какие выделяют классы опасности веществ?
- 5 Что показывает ККД? По какой формуле он рассчитывается?
- 6 Какой показатель используется для оценки уровня загрязнения воздуха? Каким образом он рассчитывается?
- 7 Что такое рН?
- 8 Какие значения рН характерны для природных вод?
- 9 Почему природные осадки имеют кислую реакцию?
- 10 Какие осадки называют кислотными?
- 11 Назовите источники поступления в атмосферу оксидов серы и азота.
- 12 Какие последствия для водных и наземных экосистем имеет техногенное закисление атмосферных осадков?
- 13 На чём основан принцип работы иономера?

2 Лабораторная работа № 2. Расчет основных показателей сообществ

Цель работы: ознакомиться с методами оценки состояния растительного сообщества.

Теоретическая часть

Растительное сообщество (фитоценоз) – объединение растений, сложившееся в результате длительного исторического процесса и обусловленное средой обитания, естественным отбором и борьбой за существование. Под растительным сообществом можно понимать комплекс видов, сжившихся между собой в ходе эволюции под действием естественного отбора, ослабивших факторы межвидовой конкуренции и выработавших различные формы симбиотических отношений и характеризующихся в итоге постоянством флористического состава. Растительное сообщество обладает динамичностью. Для него характерны фенологические смены и смены в связи с меняющимися метеорологическими условиями. Такого рода смены не приводят к нарушению и изменению основных свойств и признаков сообщества. Но имеется также ряд смен, которые приводят к коренной перестройке признаков сообщества – сукцессии.

Совокупность особей одного вида в пределах фитоценоза получило название ценопопуляции. Биоценоз – сообщество организмов в пределах биотопа. Биоценоз состоит из фитоценоза, зооценоза и микробиоценоза. Биотоп – участок земной поверхности (суши или водоема) с проживающими на нем живыми организмами и однородными абиотическими условиями среды, т. е. экотоп, преобразованный живыми организмами (биоценозом). Фактически фитоценоз – это ряд ценопопуляций, характеризующихся разной численностью, разной фитомассой и разной ролью в структурно-экологической организации сообщества. Видовая насыщенность фитоценоза, или число ценопопуляций в нем, обусловлена факторами местообитания, биологическими свойствами видов, интенсивностью межвидовой конкуренции между ними, а также степенью воздействия на фитоценоз биотических и антропогенных факторов.

Виды, играющие ведущую роль в формировании среды в пределах фитоценоза, называются эдификаторами (строителями). К эдификаторам обычно относят вид, господствующий в верхнем ярусе фитоценоза. Если в фитоценозе есть два или более видов сходных своей массой, обилием и способных оказывать большое средообразующее влияние, такие виды называются соэдификаторами. Доминанты – это очень обильные, доминирующие виды не только верхнего яруса (здесь они приравниваются к эдификатору), но всех ярусов данного фитоценоза. Например, в трехъярусном сосновом лесу с господством черники во втором ярусе и зеленых мхов в третьем будет три доминантных вида: сосна, черника и зеленый мох, в частности плевроциум Шребера. Виды, присутствующие в фитоценозе, но никогда не доминирующие (по своей роли и по

обилию), известны под названием ассектаторов.

В основе изучения флоры лежит выявление её видового состава, что позволяет анализировать флору с разных точек зрения.

С целью описания травянистых фитоценозов (лугов, степей) или живого напочвенного покрова в лесу пробную площадку закладывают в наиболее характерном месте изучаемого фитоценоза. Ее общая площадь зависит от флористического состава, структуры и облика фитоценоза, но не должна быть менее 100 м².

Сначала производится описание пробной площади в целом. А именно указывается дата проведения работ, географическое положение (область, лесничество, квартал), рельеф (микрорельеф), название почвы и типа условий место-произрастания, наименование фитоценоза и его аспект на момент обследования. Затем на пробной площади закладывается не менее 10 учетных площадок размером 1 × 1 м при высокой видовой насыщенности или 2 × 2 м при низкой видовой насыщенности. Учетные площадки располагают по диагонали, на одинаковом расстоянии друг от друга с таким расчетом, чтобы охватить всю пробную площадь.

Каждый фитоценоз отличается специфическими признаками и взаимодействиями его членов. В то же время у разных фитоценозов имеется ряд общих признаков, свойственных любому из них. Такими признаками являются следующие:

- а) флористический (видовой) состав;
- б) структура или пространственное размещение компонентов сообщества;
- в) внешний облик или аспект;
- г) жизненные формы компонентов;
- д) плотность популяций отдельных видов (численное обилие, густота стояния или число особей популяции на единицу площади);
- е) масса популяций отдельных видов (проективное покрытие, весовые или объёмные соотношения);
- ж) встречаемость видов;
- з) жизненность (виталитет) особей видов.

Изучение фитоценоза начинается прежде всего с изучения видового состава. Общее число видов на весь фитоценоз определяет видовое богатство. Другой показатель получается при расчете среднего количества видов на единицу площади, например на квадрат размером 10 × 10 м (100 м²) или 1 × 1 м (1 м²). Количество видов на единицу площади называют видовой насыщенностью.

Структура фитоценоза – это пространственное размещение компонентов сообщества, зависит от флористического состава и характера связей между компонентами. Принято различать вертикальную и горизонтальную структуру фитоценозов. Вертикальная структура фитоценоза может быть непрерывной или прерывистой (дискретной). При непрерывной вертикальной структуре особые слои растительного покрова выделить невозможно, и весь фитоценоз воспринимается как единый по вертикали (вертикальный фитоценотический континуум). В вертикально расчлененных фитоценозах, каковыми являются лесные

сообщества зоны умеренного климата, различают определенное число вертикальных слоев, называемых ярусами. Считают ярусы сверху вниз и обозначают римскими цифрами. В лесах зоны умеренного климата чаще всего можно выделить четыре яруса: I – древесный, II – кустарниковый, III – травяно-кустарничковый, IV – мохово-лишайниковый.

Аспект – это внешний вид или облик фитоценоза в момент его изучения (описания), выражающийся в первую очередь общей окраской сообщества. В течение сезона один и тот же фитоценоз может несколько раз изменить свою окраску, что выражается в смене аспектов. Например, при описании живого напочвенного покрова широколиственного леса весной, когда растения образуют, в основном, вегетативную массу и лишь кое-где видны пятна ветреницы лютиковой, – аспект зеленый, с редкими желтыми пятнами.

Обилие – количество экземпляров или число наземных побегов определенного вида растения на единице площади. Обилие является одним из неотъемлемых признаков всякого фитоценоза и характеризует плотность ценотических популяций входящих в его состав видов. Оценку обилия проводят чаще всего глазомерно, значительно реже (при подробных исследованиях) путем подсчета особей или побегов на единице площади. Глазомерная оценка производится по специальным шкалам. Чаще всего используется шкала шведского ботаника Друде.

Покрытие – проекция частей растений вида на поверхность почвы. Обычно проективное покрытие определяют на единицу площади в процентах. Оно характеризует массу ценотических популяций разных видов, зависит от развития надземной части растений и поэтому не всегда совпадает с обилием. Например, на метровой площадке один борщевик, обилие – Un , а проективное покрытие – 90 %...100 %.

Встречаемость видов в фитоценозе показывает характер их распределения на его площади. Для учета встречаемости в пределах пробной площади равномерно закладывают учетные площадки – 1 м². Таких площадок закладывается до 25 шт. Записывают все встреченные на каждой площадке виды. Закончив пересчет на всех площадках, рассчитывают коэффициент встречаемости каждого вида в процентах по формуле

$$R = 100 a / n,$$

где a – количество учётных площадок, на которых данный вид присутствует;

n – общее число учётных площадок.

Показателем степени соответствия биологических особенностей вида среде того или иного фитоценоза является жизненное состояние, или виталитет особей этого вида. Критерием виталитета особи может являться её масса, поскольку чем условия среды обитания ближе к оптимальным, тем лучше развито растение.

Для сравнения степени сходства таксономического состава рассматриваемых флор используется коэффициент Жаккара, рассчитываемый по формуле

$$K = c / (a + b - c),$$

где K – коэффициент сходства;

c – число общих для двух флор таксонов;

a, b – число таксонов в одной и в другой флоре.

При отсутствии общих видов коэффициент сходства равен нулю, а при полном сходстве списков видов он равен 1.

Степень сомкнутости крон определяют на глаз в долях: за единицу принимают такую степень сомкнутости, при которой просветы между кронами либо практически отсутствуют, либо не превышают 0,1 (10 %) – соответственно, сумма проекций крон занимает более 0,9 (90 % площади), просветы внутри самих крон при этом в расчет не принимаются.

Расчет суммы площадей сечений ствола по породам позволит правильно вывести формулу древостоя. Участие каждого вида в древостое рассчитывают в процентах, делят на 10 и округляют до целого значения. Если участие вида составляет меньше 10 %, в формуле присутствие этой породы отмечается не цифрой, а знаком «+». Сумма коэффициентов участия пород в формуле древостоя должна быть равна 10.

Характеристику растительности напочвенного покрова начинают с оценки общего проективного покрытия (ПП) всех образующих его ярусов. Затем определяют общее покрытие травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового яруса в лесу и на болоте (или травяного на лугу). Для каждого из них составляют видовой список и указывают проективное покрытие по видам – площадь горизонтальной проекции надземных частей растений (за вычетом просветов между листьями и ветвями) к общей площади, принимаемой за 100.

Различают три класса виталитета особей в ценопопуляциях. По преобладанию особей соответствующих классов ценопопуляции можно классифицировать на:

- процветающие ценопопуляции – a (преобладают особи I класса);
- равновесные ценопопуляции – b (равенство классов);
- депрессивные ценопопуляции – c (преобладают особи III класса).

Виталитетный тип ценопопуляций определяется с использованием критерия Q :

- 1 тип – процветающие ценопопуляции ($Q = \frac{1}{2} (a + b) > c$);
- 2 тип – равновесные ценопопуляции ($Q = \frac{1}{2} (a + b) = c$);
- 3 тип – депрессивные ценопопуляции ($Q = \frac{1}{2} (a + b) < c$).

Степень процветания или депрессивности ценопопуляции оценивают с помощью индекса IQ :

$$IQ = (a + b) / 2c.$$

В этом случае значения выше единицы соответствуют процветающему состоянию, а значения ниже единицы – депрессивному. Степень отклонения от единицы, соответствующей равновесному состоянию, отражает степень процветания или депрессии.

Практическое задание

- 1 С помощью программы Flora incognita на примере сквера «40 лет Победы» и поймы реки Дебря определить видовой состав древесной флоры.
- 2 Рассчитать коэффициент встречаемости видов доминантов.
- 3 Рассчитать степень сходства таксономического состава по формуле Жаккара.
- 4 Оценить виталитетный тип ценопопуляции вида эдификатора.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое ценопопуляция?
- 2 Чем отличается доминант от эдификатора?
- 3 Как оценивают виталитет ценопопуляции?
- 4 Как рассчитывают формулу древостоя?
- 5 Какую площадь должна иметь учётная площадка?
- 6 Чем отличаются пробная и учётная площадки?

3 Лабораторная работа № 3. Оценка состояния окружающей среды по обилию и разнообразию лишайников.

Цель работы: освоить методику оценки состояния окружающей среды с помощью лишеноиндикации.

Теоретическая часть

Измерение содержания токсичных веществ в объектах окружающей среды с помощью инструментальных методов дает точную картину на момент проведения измерения. Однако движение воздуха, осадки, динамика выбросов приводят к довольно сильным колебаниям измеряемых значений. Кроме того, часто бывает необходимо провести ретроспективный анализ уровня загрязнения объекта. Интегральную оценку техногенного воздействия за длительный период с определённой степенью достоверности позволяют сделать методы биоиндикации.

Одним из основных объектов глобального биологического мониторинга считаются лишайники. Лишайники реагируют на характер и состав субстрата, на котором они растут, на микроклиматические условия и состав воздуха.

Наибольшей чувствительностью обладают эпифитные лишайники (или эпифиты), т. е. лишайники, растущие на коре деревьев.

Установлено, что при повышении загрязнения воздуха первыми исчезают кустистые, затем листоватые и последними накипные (корковые) формы лишайников. Состав флоры лишайников в различных частях городов (в центре, в промышленных районах, в парках, в периферийных частях) оказался настолько различным, что исследователи стали использовать лишайники в качестве индикаторов загрязнения воздуха.

Наиболее угнетающее влияние на лишайники оказывает двуокись серы (SO_2). Уже в концентрации $0,03 \dots 0,1 \text{ мг/м}^3$ это вещество начинает действовать

на многие виды лишайников. В хлоропластах клеток водорослей появляются бурые пятна, начинается деградация хлорофилла. Концентрация $0,5 \text{ мг/м}^3$ губительна для всех видов лишайников, произрастающих в естественных ландшафтах. Однако в городской среде может обитать группа полеотолерантных (выносливых по отношению к загрязнениям) видов, которые могут существовать в довольно загрязненном воздухе.

Помимо двуокиси серы, на лишайники губительно действуют и другие загрязнители – оксиды азота (NO , NO_2) и углерода (CO , CO_2), соединения фтора и др. Кроме того, в городах сильно изменены и микроклиматические условия: пониженная влажность воздуха по сравнению с естественными ландшафтами (примерно на 5 %), повышенная на $1^\circ\text{C} \dots 3^\circ\text{C}$ температура, резкие изменения освещённости.

Для оценки антропогенного воздействия на лишайники выбирают пробные площадки. Способ выбора площадок зависит от целей исследования. Для оценки влияния на окружающую среду точечного источника загрязнения площадки закладывают по трансектам, проведенным от источника в соответствии с розой ветров и на разном расстоянии от источника. Для оценки состояния какого-либо природного или антропогенного объекта (лес, луг, парк, территория жилой застройки) площадки закладывают в случайном порядке (рандомизированно) или в систематическом порядке (в узлах координатной сетки).

Методы лишеноиндикации подразделяются на две большие группы – активную лишеноиндикацию и пассивную лишеноиндикацию. Под активной лишеноиндикацией понимают так называемые трансплантационные методы. Трансплантационные методы заключаются в том, что лишайники из незагрязненных районов трансплантируются (пересаживаются) в изучаемый район или же участки коры деревьев, покрытые лишайниками, срезаются и перемещаются на столбы или другие сооружения, расположенные в загрязненных районах. Их реакция исследуется путем периодического измерения или фотографирования.

Одним из первых симптомов поражения лишайников является уменьшение толщины таллома, а также хлороз из-за разрушения хлоропластов. Репродуктивные структуры лишайников изменяются или прекращают развитие. По скорости отмирания лишайников можно судить о мощности загрязнения. Для трансплантации часто используют лишайники, растущие на засохших ветвях деревьев. При этом ветка из чистого района переносится в исследуемый район и помещается, сохраняя пространственную ориентацию, в условия, максимально близкие по увлажнению и освещенности.

Основным методом пассивной лишеноиндикации является наблюдение за изменениями относительной численности лишайников непосредственно в местах их обитания. Для этого проводят измерения проективного покрытия лишайников на постоянных или переменных пробных площадках и получают средние значения проективного покрытия для исследуемой территории. На других аналогичных площадках или на тех же площадках через определенный промежуток времени также проводят измерения проективного покрытия. По изменению как общего проективного покрытия, так и отдельных видов можно, используя шкалы чувствительности лишайников и специальные индексы, судить

об увеличении или уменьшении загрязнения в пространстве или во времени.

При организации мониторинга методами пассивной лишеноиндикации следует придерживаться следующих основных правил:

1) предпочтительно изучение лишайников на постоянных площадках и модельных деревьях в течение длительного времени, а не разовое обследование серии пробных площадок;

2) пробные площадки должны закладываться в гомогенных по составу и возрасту фитоценозах (в идеале – в монопородных одновозрастных посадках);

3) биотические и абиотические условия среды на сравниваемых пробных площадках должны быть по возможности одинаковыми (состав и структура фитоценозов, форма рельефа, увлажнение, освещенность и т. п.);

4) модельные деревья на пробных площадках должны быть по возможности постоянными, а не случайными;

5) на сравниваемых площадках модельные деревья должны быть приблизительно одновозрастными, без видимых повреждений, принадлежать к одной из основных лесобразующих пород;

6) при использовании переменных пробных площадок (при «одноразовых» исследованиях) их количество должно быть в пределах одного десятка (в зависимости от задачи исследования), а число модельных деревьев на каждой площадке должно измеряться несколькими десятками для получения статистически достоверной информации;

7) при заложении площадок следует избегать придорожных деревьев, т. к. на их эпипокров влияют другие условия по сравнению с деревьями, растущими далеко от дорог; избегать загущенных лесонасаждений с очень низкой освещенностью; остерегаться пастбищ и лугов, которые обрабатывали пестицидами.

Для измерения численности лишайников на деревьях, а также их проективного покрытия пользуются, в основном, двумя техническими приемами – способом «линейных пересечений» и способом «палетки».

Способ «палетки» является методом непосредственного измерения проективного покрытия лишайников на стволах деревьев, т. е. измерения процентного отношения площади, покрытой лишайниками, к площади, свободной от лишайников.

Палетка представляет собой рамку, разделенную на квадраты со стороной в 1 см. Это может быть сетчатая проволоочная рамка или прозрачная пленка. Наружный размер палетки может быть любым – 10×10 , 10×20 , 10×40 см и т. д. Измерение лишайников с помощью больших палеток более трудоемко, но более точно. Прозрачную палетку можно изготовить из куска пленки или пластиковой бутылки, расчертив ее перманентным фломастером на квадраты по 1 см^2 .

Палетку накладывают на ствол дерева и фиксируют кнопками или булавками. На каждом стволе измерения производят 4 раза с четырех сторон света. Подсчет лишайников на каждом участке ствола производят следующим образом.

Подсчитывают:

– a – число квадратов, в которых лишайники занимают квадрат полностью;

- b – визуально занимают больше половины площади квадрата;
- c – занимают около половины площади;
- d – занимают меньше половины площади;
- e – лишайники отсутствуют.

Общее проективное покрытие в процентах R вычисляют по формуле

$$R = (100 a + 75 b + 50 c + 25 d) / C,$$

где C – общее число квадратов палетки.

Если на дереве растёт несколько видов лишайников, то для каждого вида покрытие может рассчитываться отдельно.

Определение проективного покрытия лишайников способом «линейных пересечений» основано на измерении не площадных, а линейных показателей. Способ заключается в наложении на окружность ствола мерной ленты с фиксированием всех пересечений ее со слоевищами лишайников. Вначале подсчитывают общую (суммарную) длину (протяженность) талломов лишайников. Затем, зная общую длину окружности ствола и принимая ее за 100 %, рассчитывают проективное покрытие лишайников (в процентах).

Более точно и количественно определить уровень нарушенности местообитания позволяют лишеноиндикационные индексы, учитывающие видовое разнообразие (число видов) и численность разных видов лишайников. На сегодняшний день существует несколько десятков лишеноиндикационных индексов.

Индекс полеотолерантности IP учитывает видовой состав лишайников и вычисляется по формуле

$$IP = \sum (A_i \cdot C_i) / C_n,$$

где n – количество видов на описанной пробной площадке;

A_i – класс полеотолерантности i -го вида (от 1 до 10);

C_i – проективное покрытие i -го вида в баллах;

C_n – сумма значений покрытия всех видов (в баллах).

Наиболее пригодной для большей территории России является классификация полеотолерантности Х. Х. Трасса (1985), составленная им на примере лишайниковых сообществ фитоценозов Прибалтики, Кавказа и Дальнего Востока.

Индекс полеотолерантности вычисляется для всех обследованных модельных деревьев на площадке в среднем. Общая обследованная площадь поверхности стволов при использовании палеток должна быть не менее 0,7 м², а при использовании мерной ленты – не менее 20 м длины окружностей. Оценка проективного покрытия дается по 10-балльной шкале: значения IP колеблются между 1 и 10. Чем больше значение IP , тем более загрязнен воздух в соответствующем местообитании. Нулевое значение IP может быть только в случае полного отсутствия лишайников.

Индекс чистоты атмосферы IAQ вычисляют по формуле

$$IAQ = \sum (Q_i \cdot C_i) / 10,$$

где Q_i – экологический индекс определенного i -го вида (или индекс ассоциированности);

C_i – показатель обилия i -го вида.

Вначале IAQ рассчитывают для каждого модельного дерева в отдельности, затем находят среднее значение для всей площадки в целом. Экологический индекс (индекс ассоциированности) Q характеризует количество видов, сопутствующих данному виду на всей пробной площадке, плюс сам описываемый вид. Фактически – это общее число видов, обнаруженных на данной площадке. Оценка проективного покрытия вида дается по такой же 10-балльной шкале, что и при расчете индекса полеотолерантности. Таким образом, чем больше проективное покрытие лишайников, и чем больше видов обитает на данном участке местности, тем выше показатель IAQ и, соответственно, тем чище воздух местообитания. Значения IAQ могут располагаться в диапазоне от 0 до бесконечности (теоретически).

Практическое задание

- 1 Определить проективное покрытие лишайников методом линейных пересечений для трёх разных видов деревьев на проспекте Мира.
- 2 Сделать вывод о пригодности данных видов для лишеноиндикации.

Контрольные вопросы

- 1 В чём заключаются недостатки и преимущества методов биоиндикации перед инструментальным методом?
- 2 Почему в качестве биоиндикатора рекомендуют использовать лишайники?
- 3 Какие правила необходимо использовать при выборе пробных площадок?
- 4 В чём заключается метод палетки?
- 5 В чём заключается метод линейных пересечений?
- 6 Что такое полеотолерантность?

4 Лабораторная работа № 4. Компьютерное моделирование эпидемического процесса

Цель работы: ознакомиться с методами оценки взаимоотношений между различными видами живых организмов в экосистеме.

Теоретическая часть

В медицинской классификации эпидемией называют прогрессирующее распространение инфекционного заболевания на уровне выше среднего на данной территории. В случае распространения эпидемии на большие территории или территории многих стран говорят о пандемии. Для эпидемии среди животных применяется термин «эпизоотия», а среди растений – «эпифитотия». Этим явлениям ученые также уделяют большое внимание, поскольку они, в свою

очередь, помогают понять механизм распространения инфекций и запланировать профилактические мероприятия.

Изучение механизмов развития и распространения эпидемий является важным способом борьбы с заболеваниями наряду с поиском новых лекарств, вакцинацией и профилактическими мерами. На помощь медикам пришли математики – для этого им пришлось объединить дифференциальные уравнения и теорию вероятности.

Первую попытку использовать математический аппарат для исследования механизмов распространения заболеваний предпринял Даниил Бернулли, ранее открывший первые законы гидродинамики. Следующий шаг сделал Уильям Фарр, применивший в 1840 г. нормальное распределение к анализу смертности от оспы.

Наконец, опираясь на работы большого числа предшественников, британские ученые Андерсон Кермак и Уильям Маккендрик разработали широко применяемую сегодня модель SIR. Эта аббревиатура происходит от английских слов *Susceptible – Infected – Recovered*, буквально означающих «восприимчивые – инфицированные – выздоровевшие». Под «восприимчивыми» тут подразумеваются еще не инфицированные организмы.

В рамках этой модели с помощью систем дифференциальных уравнений (при условии непрерывности времени и большой популяции) или разностных уравнений (при дискретном времени и ограниченной популяции) описывается динамика распространения заболевания.

4.1 Модель SIR.

SIR-модель получила заслуженную популярность в силу простоты построения и использования. Ее применение позволяет точно моделировать эпидемии гриппа и других заболеваний в больших городах, вводить новые параметры и анализировать разные сценарии.

Система уравнений SIR

$$\begin{aligned} dS/dt &= -(\beta \cdot I \cdot S) / N; \\ dI/dt &= (\beta \cdot I \cdot S) / N - \gamma \cdot I; \\ dR/dt &= \gamma \cdot I, \end{aligned}$$

где t – время;

S – численность восприимчивых индивидов в момент времени t ;

I – численность инфицированных индивидов в момент времени t ;

R – численность переболевших индивидов в момент времени t ;

β – коэффициент интенсивности контактов индивидов с последующим инфицированием;

γ – коэффициент интенсивности выздоровления инфицированных индивидов.

Первое уравнение системы означает, что изменение числа здоровых (и при этом восприимчивых к заболеванию) индивидуумов уменьшается со временем пропорционально числу контактов с инфицированными. После контакта происходит заражение, восприимчивый переходит в состояние инфицированного.

Второе уравнение показывает, что скорость увеличения числа заразившихся

растет пропорционально числу контактов здоровых и инфицированных и уменьшается по мере выздоровления последних.

Третье уравнение демонстрирует, что число выздоровевших в единицу времени пропорционально числу инфицированных. Иначе говоря, каждый заболевший через некоторое время должен поправиться.

Таким образом, мы видим, что заболевание в модели SIR развивается по схеме «восприимчивые становятся инфицированными, потом выздоравливают». При этом численность населения остаётся неизменной, то есть не учитывается рождаемость и смертность.

В 2012 г. британская компания Ndemic Creation выпустила игру Plague Inc. – биологический симулятор эпидемий на Земле. На базовых уровнях игры распространение заболевания происходит в точном соответствии с моделью SIR.

SIR-модель перестает работать если нужно учитывать неоднородность популяции (например, различную плотность населения в разных районах), разные пути передачи инфекции и факторы случайности, значимые в малых популяциях и на начальной фазе распространения заболевания.

Развитием модели SIR стали, в частности, следующие модели:

1) SIRS – «восприимчивые – инфицированные – выздоровевшие – восприимчивые»: модель описания динамики заболеваний с временным иммунитетом (выздоровевшие индивиды со временем снова становятся восприимчивыми);

2) SEIR – «восприимчивые – контактные (Exposed) – инфицированные – выздоровевшие»: модель для описания распространения заболеваний с инкубационным периодом;

3) SIS – «восприимчивые – инфицированные – восприимчивые»: модель для распространения заболевания, к которому не вырабатывается иммунитет;

4) MSEIR – «наделенные иммунитетом от рождения (Maternally derived immunity) – восприимчивые – контактные – инфицированные – выздоровевшие»: модель, учитывающая иммунитет детей, приобретенный внутриутробно.

4.2 Модель SEIR.

Именно по этой модели развиваются по-настоящему опасные эпидемии, поскольку длительный инкубационный период может препятствовать своевременному обнаружению заболевания. В этом случае есть риск, что заболевание охватит значительное число индивидов в популяции.

Инфекция развивается по схеме «восприимчивые – контактные – инфицированные – выздоровевшие» и описывается системой уравнений

$$dS/dt = \mu \cdot N - \mu \cdot S - (\beta \cdot I \cdot S) / N;$$

$$dE/dt = (\beta \cdot I \cdot S) / N - (\mu + \alpha) \cdot E;$$

$$dI/dt = \alpha \cdot E - (\gamma + \mu) \cdot I;$$

$$dR/dt = \gamma \cdot I - \mu \cdot R,$$

где μ – уровень смертности;

α – величина, обратная среднему инкубационному периоду заболевания;

E – численность индивидов – носителей заболевания в момент времени t .

Как и в модели SIR, первое уравнение системы означает, что изменение числа здоровых (и при этом восприимчивых к заболеванию) индивидуумов уменьшается со временем пропорционально числу контактов с инфицированными. После заражения здоровый индивид переходит в состояние контактного по данному заболеванию, или носителя инфекции.

Второе уравнение вносит задержку по времени при переходе из состояния контактного в состояние инфицированного (больного). Это происходит через время, равное инкубационному периоду болезни.

Третье уравнение описывает переход из состояния «контактный» в состояние «инфицированный».

Четвертое уравнение демонстрирует, что число выздоровевших в единицу времени пропорционально числу инфицированных. При этом в каждом состоянии индивидуум может погибнуть, что учитывает коэффициент μ в каждом уравнении.

Иначе говоря, в каждый момент времени каждый индивидуум с определенной вероятностью может заразиться, через некоторое время заболеть, а затем поправиться либо погибнуть.

Численность популяции $N = S + E + I + R$ при этом не является постоянной с течением времени (рисунок 4.1).

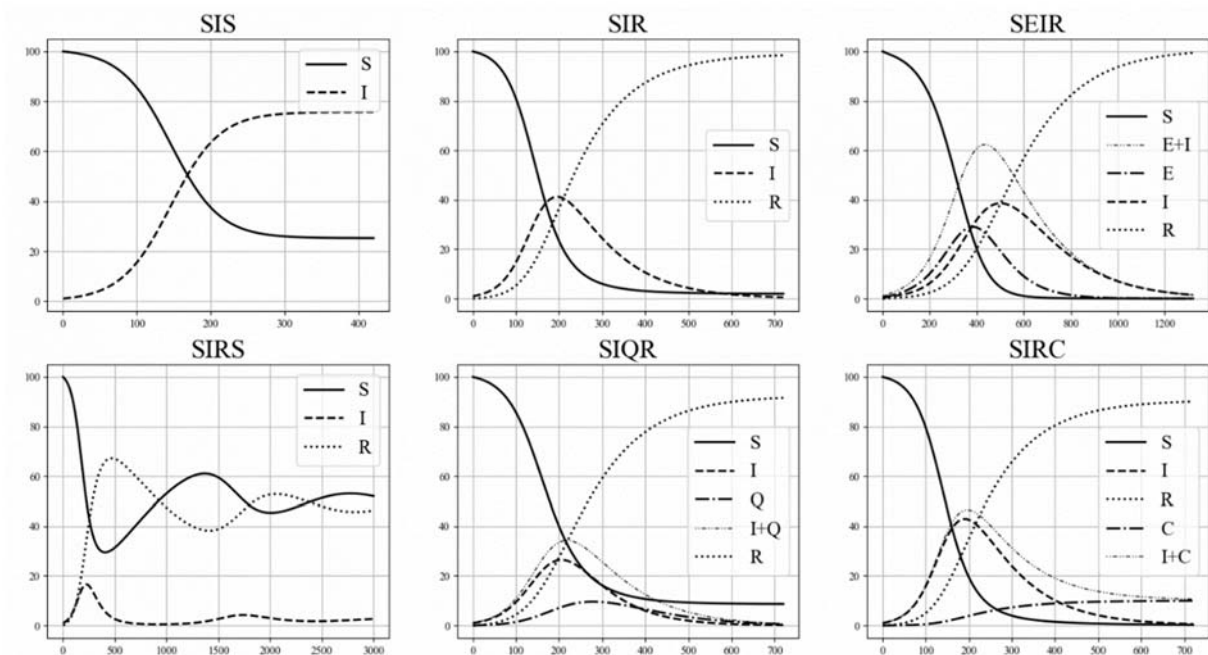


Рисунок 4.1 – Результат прогнозирования динамики численности популяции с помощью различных моделей

4.3 Модели в численной форме.

В ряде случаев (например, для написания программ) системы дифференциальных уравнений удобно представлять в численной форме.

Всю популяцию, которая подвержена эпидемии, разделили на три группы: S (susceptible – восприимчивые, т. е. здоровые, не заразные, но могут заразиться,

т. к. не имеют иммунитета), I (infected – инфицированные, т. е. болеют и заразны) и R (recovered – выздоровевшие, т. е. здоровые, не заразные и не могут заразиться, т. к. имеют иммунитет). Очевидно, что до начала эпидемии 100 % индивидов находятся в группе S (восприимчивые) и по нулям – в остальных группах. Для удобства будем считать, популяция в 100 человек, соответственно, $S = 100$, $I = 0$, $R = 0$. В таких условиях эпидемия не пойдёт, т. к. чтобы она началась, должен быть хотя бы один больной. Поэтому рассмотрим другую ситуацию: $S = 99$, $I = 1$, $R = 0$. Вот теперь начнётся эпидемия и её моделирование заключается в последовательном высчитывания состояния популяции на следующем шаге.

Один инфицированный встретит и заразит в конкретный момент времени конкретного восприимчивого с вероятностью β / N .

Тогда всего он заразит восприимчивых индивидов: $\beta \cdot S / N$, а все инфицированные вместе заразят восприимчивых: $\beta \cdot I \cdot S / N$.

Таким образом, количество восприимчивых на втором шаге нашей модели уменьшится на $0,99\beta$.

Инфицированные выздоравливают тоже с какой-то вероятностью γ , которую часто рассматривают как число, обратное времени болезни. Имеется в виду, что если болезнь длится 10 дней, то больной индивид в конкретный день выздоровеет с вероятностью $\gamma = 1/10$. Количество выздоравливающих на каждом шаге будет равно $I \cdot \gamma$.

Количество инфицированных на втором шаге, помимо того, что увеличится на $0,99\beta$, ещё уменьшится на $I \cdot \gamma$. Количество выздоровевших увеличится на $I \cdot \gamma$. Относительного полученных значений будет рассчитываться следующий шаг модели.

В общем виде модель SIR формулируется следующими уравнениями:

$$S_{n+1} = S_n - (\beta \cdot I_n \cdot S_n) / N;$$

$$I_{n+1} = I_n + (\beta \cdot I_n \cdot S_n) / N - \gamma \cdot I_n;$$

$$R_{n+1} = R_n + \gamma \cdot I_n.$$

SEIR-модель учитывает инкубационный период (E – exposed, индивиды болеют, но не заразны и со временем полностью заболеют). В такой модели заражение восприимчивых происходит таким же способом, как в модели SIR, но попадают такие особи не в группу I , а в группу E . А из E с определённой вероятностью (α – число, обратное длительности инкубационного периода) происходит переход уже в I .

В численную форму модель преобразуется так же, как и модель SIR.

Практическое задание

- 1 Преобразовать модель SEIR из дифференциальной формы в численную.
- 2 Рассчитать по численной форме модели SEIR значения S , E , I и R на 25 итераций. Начальную численность принять за 100, остальные параметры указаны в таблице 4.1.
- 3 Полученные значения внести в таблицу 4.2.

5 Лабораторная работа № 5. Экспоненциальная и логистическая кривые роста популяции. Уравнение Ферхюльста – Пирла

Цель работы: ознакомиться с методами математического моделирования процессов в экосистемах.

Теоретическая часть

Одна из первых моделей роста популяции была предложена еще в 1798 г. Т. Мальтусом. В своем труде «Опыт закона о народонаселении» Мальтус, изучив динамику численности населения на известной ему территории, выдвинул гипотезу, согласно которой неконтролируемый рост популяций всегда превосходит по скорости рост средств существования. Его гипотеза указывала на геометрическую прогрессию роста неконтролируемой популяции в сравнении с арифметической прогрессией роста источников существования.

Необходимо учитывать, что модель Мальтуса и другие модели динамики популяций были написаны в дифференциальной форме. Такая запись предполагает, что время однородно и непрерывно. Она не учитывает сезонность размножения и повышенной смертности. В бореальном климате с выраженными временами года целесообразно учитывать «дискретное время» в виде последовательности циклов, например учётных лет.

Одной из важнейших характеристик экосистемы является динамика численности популяций, входящих в её состав. Эта динамика зависит от многих факторов, отражающихся в коэффициенте прироста K_n – соотношении численности популяции в конце и в начале определенного временного диапазона. Это соотношение зависит от начальной численности популяции и от количества родившихся и умерших особей за этот период времени.

Например, в начале учётного года численность популяции n_0 насчитывала 1000 особей. В течение года погибло 100 особей, родилось 200. Численность к началу следующего года n_1 составит 1100 особей. Тогда $K_n = 1,1$, т. к.

$$K_n = n_1 / n_0 = (1000 - 100 + 200) / 1000.$$

И обратно, зная K_n , можно рассчитать численность популяции к началу следующего года:

$$n_1 = n_0 \cdot K_n;$$

$$n_2 = n_1 \cdot K_n = (n_0 \cdot K_n) \cdot K_n;$$

$$n_3 = n_2 \cdot K_n = ((n_0 \cdot K_n) \cdot K_n) \cdot K_n.$$

В стабильных условиях рождаемость и смертность будут относительно стабильны. В таком случае численность популяции за n_i учётный год

$$n_i = n_0 \cdot K_n^i.$$

Такая зависимость называется экспоненциальной.

Если K_n больше 1, то численность популяции неограниченно растёт. Если K_n меньше 1 то убывает до полной гибели. При $K_n = 1$ численность популяции стабильна. Это значение называют бифуркационным.

Модель Мальтуса была первым опытом математического моделирования экологических процессов и в этом его заслуга. Однако сам Мальтус и его последователи не учитывали многообразия факторов, действующих на реальные популяции в экосистемах, в том числе на популяцию человека на планете. В настоящее время проблемой большинства государств стало снижение рождаемости, старение и вымирание населения.

В природных экосистемах численность популяции ограничена ёмкостью экологической ниши (кормовой базы, мест для гнездования и т. п.).

Первая модель, учитывающая это ограничение (ёмкость среды обитания), была предложена в 1825 г. Б. Гомпертцем.

В его модели учитывается отношение натуральных логарифмов реальной и предельно возможной численностей популяции.

Большинство видов живых организмов имеет механизмы ограничения численности в неблагоприятных условиях. При повышении плотности населения и недостатке питания снижается плодовитость, повышается смертность молодняка, распространяются паразиты и возбудители инфекционных заболеваний.

Всё это влияние перенаселённости экотопа отражает коэффициент конкуренции K_k .

Популяционные модели становятся нелинейными, если принять во внимание ограниченность доступных популяции ресурсов, которая характерна для реальной жизни. П. Ферхюльстом (1838) и Р. Пирлом совместно с Л. Ридом (1920) предложена модель, учитывающая этот фактор. В модели Ферхюльста – Пирла он обозначается как «дополнительная убыль из-за внутривидовой конкуренции, пропорциональная числу встреч особей друг с другом». Собственно встречи особей не обязательны. Для учёта влияния внутривидовой конкуренции больше подходит плотность популяции или её численность на условной единичной территории.

В таком случае модель динамики численности приобретает вид

$$n_i = n_0 \cdot (K_n - K_k \cdot n_0)^i.$$

Такая модель называется логистической.

Модель Лотки – Вольтерра – это модель взаимодействия двух популяций разных видов типа «хищник – жертва», названная в честь её авторов (Альфред Лотка, 1925; Вито Вольтерра, 1926), которые предложили модельные уравнения независимо друг от друга.

В численной форме она представляет собой систему двух взаимозависимых уравнений. Для целей компьютерного моделирования уравнения записывают на соответствующем языке программирования.

Например, при использовании языка Object Pascal запись выглядит следующим образом:

```

yg2:=(a-e*yg1)*yg1-c*yh1*yg1-g;
yh2:=b*yh1+d*yh1*yg1;

```

Здесь используются следующие переменные

yg1 – начальная численность жертвы.

yh1 – начальная численность хищника.

yg2 – численность жертвы на следующем шаге измерения (например, через год).

yh2 – численность хищника на следующем шаге измерения.

a – коэффициент прироста жертвы (это отношение рождаемости к смертности. Он всегда не меньше 1 или популяция жертвы самопроизвольно вымрет).

e – коэффициент конкурентного давления в популяции жертвы. Он связан с численностью популяции и показывает, насколько снижается прирост за счет конкуренции в условиях ограничения ресурсов.

c – коэффициент «выедания» жертвы хищником.

g – квота отлова жертвы, которая изначально устанавливается как доля от стабильной численности жертвы, принятой за 1, а затем не меняется.

b – коэффициент прироста «голодного хищника». Он меньше 1, т. к. у голодных рождаемость меньше, чем смертность.

d – дополнительный коэффициент прироста «сытых хищников». Обычно устанавливают примерно так, чтобы $b+d=1$. Тогда численность популяции будет стабильной при достаточном количестве пищи.

Затем идёт отображение полученных значений на графике в виде координаты у и переприсвоение значений:

```

yg1:=yg2;
yh1:=yh2;

```

То есть каждое последующее значение численности рассчитывается из предыдущего с использованием оператора цикла.

Практическое задание

1 Исследовать экспоненциальную модель динамики популяций:

а) откройте исполняемый файл;

б) установите значения:

– начальное число хищников – 0,0;

– прирост жертв – 1,01;

– конкуренция жертв – 0,00;

в) нажмите кнопку «Показать»;

г) изменяя значения прироста жертв (1,005; 1,001; 1,000; 0,999; 0,995; 0,990), получите серию экспоненциальных кривых;

д) сделайте вывод, какое значение прироста является бифуркационным и почему.

2 Исследовать логистическую модель динамики популяций:

а) вернитесь к исходным значениям (закройте и вновь откройте исполняемый файл);

б) установите значения:

– начальное число хищников – 0,0;

в) изменяя значения конкуренции жертв (0,06; 0,08; 0,10; 0,20; 0,50), получите серию логистических кривых;

г) найдите такое значение коэффициента конкуренции, при котором численность будет сохраняться на стационарном уровне;

д) сделайте вывод, на какой параметр влияет значение коэффициента конкуренции.

3 Исследовать двухпопуляционную модель «хищник – жертва»:

а) восстановите исходные значения (закройте и откройте исполняемый файл);

б) изменяя параметры модели, определите, как зависит динамика численности популяций хищника и жертвы от:

– начальной численности популяций;

– конкуренции жертв;

– выедания жертв;

– прироста жертв;

– прироста хищников;

– отлова жертв.

4 Записать выводы в тетрадь.

Контрольные вопросы

1 Какие параметры используют при построении экспоненциальной модели?

2 Какие ограничения не учитывает экспоненциальная модель?

3 Как рассчитывают коэффициент прироста?

4 Чем ограничивается численность популяции в логистической модели?

5 На какой параметр влияет коэффициент конкуренции в логистической модели?

6 Лабораторная работа № 6. Построение сукцессионных рядов биомов умеренного пояса

Цель работы: ознакомиться с закономерностями и методами прогнозирования развития экосистем умеренного пояса.

Теоретическая часть

Сложные взаимодействия между климатом, субстратом и живыми организмами приводят к образованию специфических региональных сообществ – биомов.

Биомы – это крупные региональные экосистемы с характерным типом растительности и другими особенностями ландшафта. Современная биосфера (экосфера) является совокупностью всех биомов.

В соответствии со средой обитания организмов, выделяют наземные, пресноводные и морские биомы.

Тип наземных биомов определяют по зрелому (климаксному) растительному сообществу, название которого и служит названием биома, тип водных биомов – по геологическим и физическим особенностям.

Основные типы современных биомов и их продуктивность показаны в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Основные типы биомов земли и их продуктивность

Название	Биомасса, т/га	Продуктивность за год, г/м ²
Наземные биомы:		
тундра: арктическая и альпийская	6	10...00
северные (бореальные) хвойные леса – тайга	350	400...2000
листопадные леса умеренной зоны	300	600...2500
степи умеренной зоны	40	200...2000
тропические травяные сообщества и саванны (степи с одиноко стоящими деревьями или группами деревьев)	40	200...2000
средиземноморские формации – районы с дождливой зимой и засушливым летом (чаппараль, маки, скрэб)	60	250...1200
полупустыни и пустыни	7	10...250
тропические сезонные полувечнозеленые леса	350	100...2500
тропические влажные вечнозеленые леса	450	1000...3500
Пресноводные экосистемы:		
стоячие водоёмы – озера, пруды	0,2	100...1500
текучие воды – реки, ручьи	0,2	100...1500
болота и болотистые леса	150	800...3500
Морские экосистемы:		
открытый океан	0,03	2...400
континентальный шельф (прибрежные воды)	0,1	200...600
коралловые рифы	20	500...4000
районы апвеллинга (зоны поднятия придонных вод к поверхности)	0,2	400...1000
эстуарии (устья рек, впадающих в моря)	10	200...3500

Главным фактором, определяющим формирование биома, является его географическое положение. Оно обуславливает тип климата (температуру, количество осадков) и почвенные (эдафические) факторы.

В зависимости от годового количества осадков формируются следующие типы экосистем::

- 0...250 мм – пустыни;
- 250...750 мм – степи, саванны;
- 750...1250 мм – сухие леса;
- более 1250 мм – влажные леса.

В соответствии с учением В. Н. Докучаева (1899), климат в значительной степени определяет тип почв данной местности: температура и количество осадков определяют скорость и направление процессов почвообразования –

разрушение материнской породы и миграцию в почве минеральных солей и частиц. От климата также зависит и видовой состав растительности, характер растительного опада и процессов его минерализации. В зависимости от режима увлажнения происходит формирование гумуса.

На формирование биомов оказывает влияние и континентальность климата. В силу различий между площадями суши и моря в Северном и Южном полушариях структура биомов Северного полушария не является зеркальным отображением биомов Южного. В Южном полушарии практически нет биомов тундры, тайги и листопадных лесов умеренного пояса, поскольку на этих широтах там расположен океан.

При изменении условий часть видов получает преимущество и вытесняет менее приспособленные виды. Видовой состав экосистемы изменяется. Этот процесс изменения называют сукцессией. После того, как условия стабилизируются, сукцессия постепенно прекращается – формируется климаксное сообщество.

Скорость сукцессии зависит от:

- скорости изменения условий;
- скорости инвазии новых видов;
- скорости развития, размножения и распространения инвазивных видов;
- времени, необходимого для вытеснения аборигенных видов.

На примере геологической летописи Земли можно проследить, как на протяжении эр и периодов происходила постепенная смена видов растений и животных: одни виды вымирали, а их место занимали другие. Смена биоценозов, связанная с вымиранием видов в процессе биологической эволюции и замещением их другими видами, называется эволюционной сукцессией. Она происходит в длительные, эволюционно значимые промежутки времени. Смены биоценозов, не связанные с эволюцией видов и происходящие в короткие промежутки времени, называют экологическими сукцессиями. Цепи сменяющих друг друга биоценозов носят название сукцессионных рядов или сукцессионных серий.

Каждый последующий биоценоз в сукцессионном ряду является более устойчивым и эффективнее использует ресурсы среды, обитания. Поэтому климаксные сообщества могут оставаться стабильными сотни и тысячи лет.

Различают два вида экологических сукцессий – первичные и вторичные.

Первичные сукцессии – процессы развития и смены биоценозов на первично свободных субстратах – не заселенных ранее участках.

Первичные сукцессии возникают на субстрате, изначально не содержащем органического вещества: голой скале, застывшем лавовом потоке, вулканических островах, песчаной дюне, месте отступившего ледника и т. д.

Организмов, поселяющихся здесь первыми, называют пионерами (от лат. *pioneer* – первый), их главной задачей является образование почвы. Пионерами являются бактерии, лишайники, водоросли и мхи, споры и частицы которых приносятся ветром. Их размеры, биомасса и продуктивность очень малы. Поэтому они способны обходиться минимальными ресурсами. Под действием солнца, ветра, воды и выделяемых пионерами органических кислот первичный субстрат разрушается (выветривается) формируется рыхлая водо- и воздухо-

проницаемая почвообразующая порода, высвобождаются биогенные элементы. Хотя биомасса пионеров очень мала, в породе постепенно накапливаются продукты её разложения, образующий с минералами почвообразующей породы глиногумусовый комплекс. Этот комплекс определяет физико-химические свойства почвы.

По мере накопления гумуса и развития почвы на ней могут расти и развиваться более сложные организмы – сосудистые растения, почвенные животные, травоядные, хищники.

На каждой стадии сукцессии видовое богатство биоценоза возрастает, но на поздних стадиях несколько снижается из-за вытеснения менее приспособленных видов. Климатические сообщества отличаются обилием и сложностью пищевых цепей. Это позволяет им использовать ресурсы среды наиболее полно и придаёт устойчивость к внешним воздействиям.

Развитие биоценоза на месте быстро отступающего ледника описано на Аляске (Р. Риклефс, 1979). За 250 лет наблюдений ледник отошел на 100 км, а на его месте шла сукцессия: мхи → осоки → стелющиеся ивы → кустарниковые ивы → ольха → ель.

Возникновение озёр связано с заполнением водой углублений и трещин в земной коре. Если водоём питается дождевыми водами, то пионерами являются бактерии, а также одноклеточные растения и животные, смытыми с водосборной территории или принесенные водоплавающими птицами. Такая экосистема развивается довольно медленно, так как многоклеточные водные организмы обычно не способны перемещаться самостоятельно по суше.

Если водоём питается ручьями и реками, то пионерами являются разнообразные обитатели этих водотоков, вплоть до хищных рыб. Со временем на дне накапливаются органические вещества (донные отложения). Они особенно обильны в прибрежной зоне, где достаточно света, кислорода и вода хорошо прогревается. Кроме того, ветер и волны прибивают к берегу плавающие на поверхности воды водоросли и другие растения. Прибрежная зона зарастает полуводными и влаголюбивыми укорененными сосудистыми растениями. Эти процессы могут привести к зарастанию водоёма.

Вторичные сукцессии являются восстановительными – происходят на месте погибших или сильно повреждённых сообществ. Вторичные сукцессии идут намного быстрее первичных поскольку субстратом является уже сформировавшаяся почва. Сукцессия на субстрате, содержащем органическое вещество, называется гетеротрофной, но если при пожаре вся органика выгорела, то сукцессия идет по типу первичной – автотрофная сукцессия. Примером вторичной сукцессии является развитие леса на заброшенном поле: на первом году на нем прорастают семена трав, затем светолюбивые деревья – березы и осины. Вырастая и смыкая свои кроны, они создают тень, неблагоприятную для трав, но в тени берез могут вырастать проростки ели. Ель вселяется на поле через 30...50 лет. Когда ель достигает первого яруса, светолюбивые березы под её покровом погибают и образуется климаксное сообщество – еловый лес. Весь процесс занимает 80...120 лет. Данный вид сукцессии является самым распространенным в средней полосе России. В более южных районах на

заброшенных полях развиваются дубово-буковые леса: травы → сосны → смешанный лес → широколиственный лес (дуб, бук, граб). Процесс также занимает около 100 лет. Часто из-за изменений почвы, рельефа, климата и других факторов, конечные стадии вторичных сукцессий сильно отличаются от первичных климаксных сообществ, в большинстве случаев они беднее их. При длительном воздействии на экосистемы стрессовых факторов скорость сукцессий может замедляться и даже останавливаться. Это явление называют «снятием климаксной фазы». Особенно медленным течением отличаются сукцессии в северных экосистемах – тундре. Достижение климакса здесь занимает до тысячи лет. В связи с этим тундровые экосистемы считаются наиболее ранимыми, трудно залечивающими повреждения.

В настоящее время считают, что ведущую роль в сукцессиях играют биотические факторы – изменения среды, производимые организмами: они делают её менее пригодной для себя, но пригодной для заселения другими видами. Изменения касаются освещенности (затенение), увлажнённости, кислотности, состава почв и др.

В зависимости от вызвавших сукцессии причин их классифицируют на:

- автогенные сукцессии (от лат. *auto* – сам) – вызванные внутренними процессами, происходящими в экосистемах;
- аллогенные (от лат. *allos* – другой) – вызванные внешними причинами.

Виды организмов, участвующих в ходе сукцессий, подразделяют по их месту в сукцессионном ряду: виды пионеры → ранние сукцессионные виды → поздние сукцессионные виды → климаксные виды. Места, занимаемые видами в сукцессионных рядах, определяются:

- их требованиями к среде;
- скоростью заселения ими новых мест обитания (следование стратегиям *r*-или *K* отбора);
- изменениями, производимыми ими в среде.

Видами-пионерами вторичной сукцессии обычно являются быстрорастущие светолюбивые растения, производящие много мелких, легко разносимых ветром семян или спор. Для пионеров характерно следование стратегии *r*-отбора – быстрый рост и размножение по экспоненциальному типу с целью как можно более быстрого заселения среды. Под влиянием пионеров в среде развиваются изменения, делающие её пригодной для заселения следующими видами.

Практическое задание

1 Используя интернет-ресурсы, найти информацию о следующих живых организмах: *Salix arctica*, *Poa alpina*, *Astragalus frigidus*, *Pinus sibirica*, *Betula rotundifolia*, *Cladonia pyxidate*, *Anabaena*, *Stereocaulon alpinum*, *Hypnum cupressiforme*.

2 Построить сукцессионный ряд из этих организмов для первичной сукцессии на морене.

3 Обосновать построение ряда.

4 Используя интернет-ресурсы, предложить два примера сукцессионных рядов для первичной и вторичной сукцессий.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое сукцессия?
- 2 В каких случаях она происходит?
- 3 От чего зависит скорость сукцессии?
- 4 Какое сообщество называют климаксным?
- 5 Как развивается первичная сукцессия?
- 6 В каких случаях происходит вторичная сукцессия?

7 Практическая работа № 7. Построение диаграмм потока энергии в экосистемах

Цель работы: ознакомиться с закономерностями превращения энергии в экосистемах.

Теоретическая часть

Универсальным источником энергии для природных экосистем, за исключением рифтовых, является солнечный свет. Даже в афотической зоне океана используется энергия Солнца, законсервированная в органических соединениях.

Универсальная модель потока энергии представлена на рисунке 7.1.

Из общего потока энергии, достигающего фотосинтетических поверхностей L , часть энергии отражается; оставшаяся часть L_A поглощается растительным покровом. Большая часть поглощенной энергии превращается в тепло, меньшая используется в процессе фотосинтеза, накапливаясь в форме органических веществ. За вычетом затрат на дыхание R формируется чистая первичная продукция P_N .

На этом этапе энергетический бюджет для данной модели экосистемы оценивается следующим образом: $L = 3000$ ккал/м² в день, $L_A = 1500$, т. е. 50 % от L ; $P_N = 15$, т. е. 1 % от L_A .

На уровнях консументов потери энергии приобретают форму не используемой энергии NU и энергии, не ассимилированной консументами NA , т. е. энергии, выделенной с экскрементами. $P_2 = 1,5$ ккал/м² в день, т. е. 10 % от P_N , и $P_3 = 0,3$ ккал/м² в день, т. е. 20 % от предыдущего уровня. Таким образом, на первом трофическом уровне поглощается 50 % падающего света, а переходит в химическую энергию пищи всего 1% поглощенной энергии. Вторичная продукция на каждом последующем трофическом уровне консументов составляет около 10 % предыдущей, хотя на уровне хищников эффективность усвоения может быть выше.

Энергетический баланс одного трофического уровня удобно рассмотреть с помощью универсальной модели, которая приложима к любому живому компоненту системы, будь то растение, животное, микроорганизм или же особь, популяция, трофическая группа (рисунок 7.2).

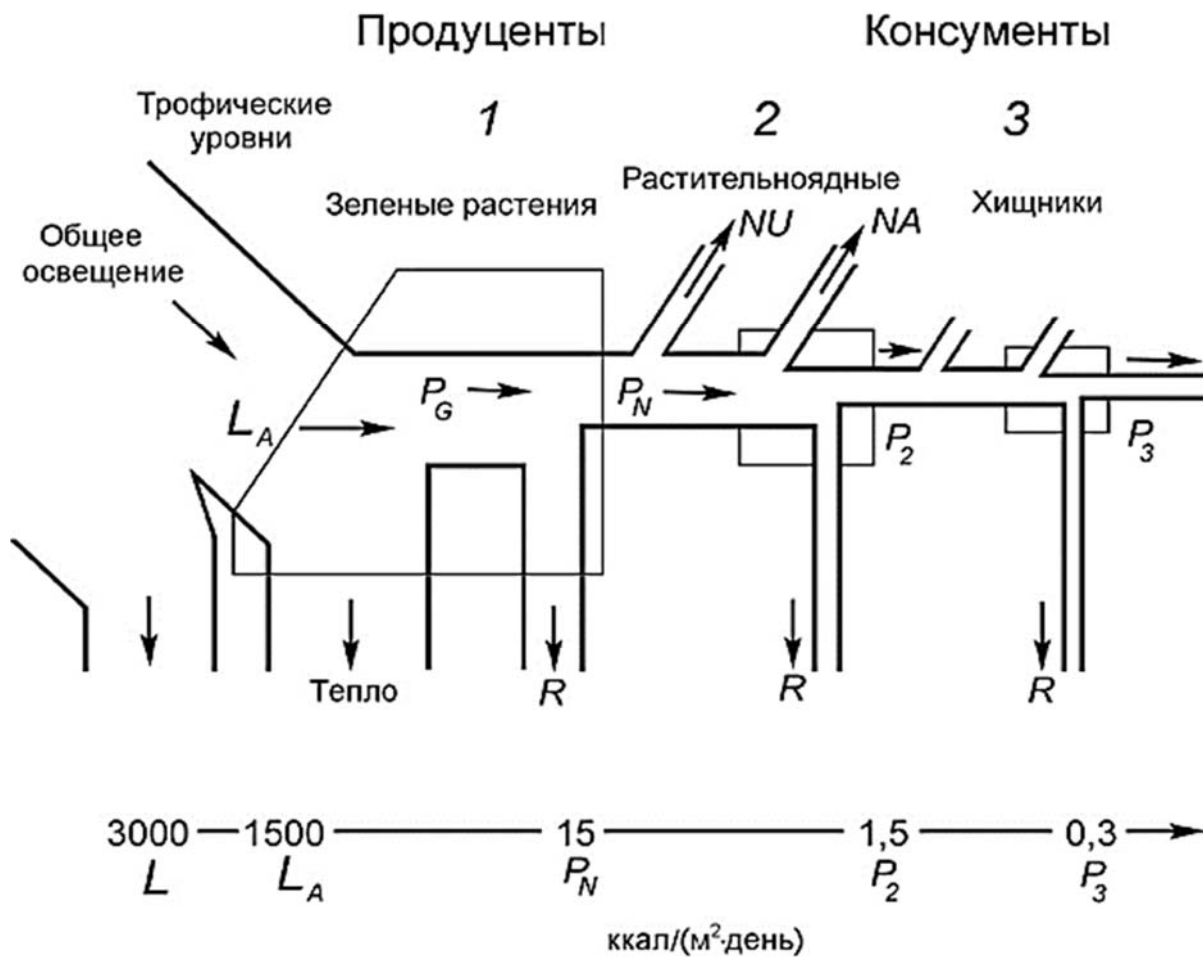


Рисунок 7.1 – Упрощенная диаграмма потока энергии, показывающая три трофических уровня в линейной пищевой цепи

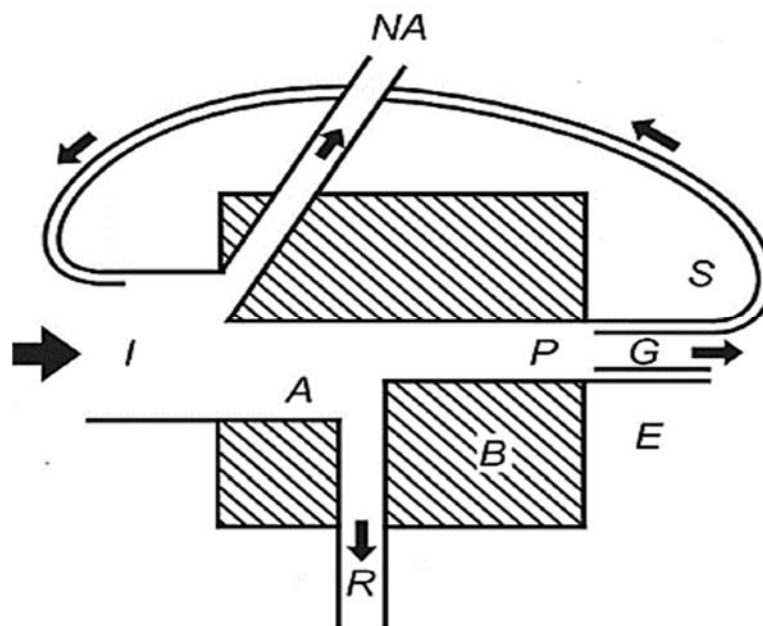


Рисунок 7.2 – Компоненты универсальной модели потока энергии для одного трофического уровня

Не вся энергия, поступившая на трофический уровень I , подвергается превращению. Часть ее NA не усваивается. Например, пища может пройти через пищеварительный тракт, не включаясь в метаболизм, а часть энергии света, доступная растению, рассеивается в виде тепла. Используемая, или ассимилируемая, часть энергии A тратится на дыхание R и продуцирование органического вещества P . Продукция может принимать различные формы: G – рост, или увеличение биомассы; E – ассимилированное органическое вещество, выделяемое с экскрементами или секретируемое (простые сахара, аминокислоты, мочевины, слизь и т. д.); S – запас (например, жировые накопления, которые могут быть использованы позднее). Обратный путь запасенной продукции называют также «рабочей петлей», поскольку это та часть продукции, которая обеспечивает организм энергией в будущем (например, хищник использует энергию запасенных веществ для того, чтобы найти новую жертву). Оставшаяся за вычетом E часть продукции формирует биомассу B .

Суммируя все статьи поступления и расхода энергии, получим

$$A = I - NA;$$

$$P = A - R;$$

$$P = G + E + S;$$

$$B = P - E;$$

$$B = G + S.$$

Каналы притока энергии и связи данного вида с другими составляют диаграмму пищевой сети с названием отдельных видов в ее узлах (рисунок 7.3). Процедура построения сетевой диаграммы включает:

- 1) составление схемы распределения популяций по трофическим уровням;
- 2) соединение их пищевыми связями;
- 3) определение с помощью универсальной модели ширины каналов потоков энергии; при этом наиболее широкие каналы будут проходить через популяции видов-полифагов.

Главное, что интересует исследователя при описании энергетики экосистемы с использованием универсальной модели, – величина потока энергии на входе каждой из популяций. Все превращения энергии внутри популяции оценивают с использованием различных размерно-весовых методов. При этом особое внимание привлекают полифаги. Так, в приведенном выше примере (см. рисунок 7.3) поденка *Baetis rhodani* использует сразу четыре источника энергии: листовой опад, зеленые водоросли, скопившийся на дне детрит и диатомовые водоросли, чем и определяется высокая численность популяции этого вида. Хищники в свою очередь «основывают свою энергетiku» главным образом за счет поедания личинок поденок. Некоторые из них добавляют к своему рациону зеленые водоросли.

Во-вторых, универсальная модель потока энергии может представлять определенный энергетический уровень. В этом варианте прямоугольники биомассы и каналы потоков энергии представляют все популяции, поддерживаемые одним

источником энергии. Обычно пищей лисам служат частично растения (плоды и т. д.), частично травоядные животные (зайцы, полевые мыши и др.). Если мы хотим подчеркнуть аспект популяционной энергетики, то всю популяцию лис необходимо изобразить одним прямоугольником. Если же требуется распределить метаболизм популяции лис на два трофических уровня соответственно пропорции растительной и животной пищи, то следует построить два или несколько прямоугольников.

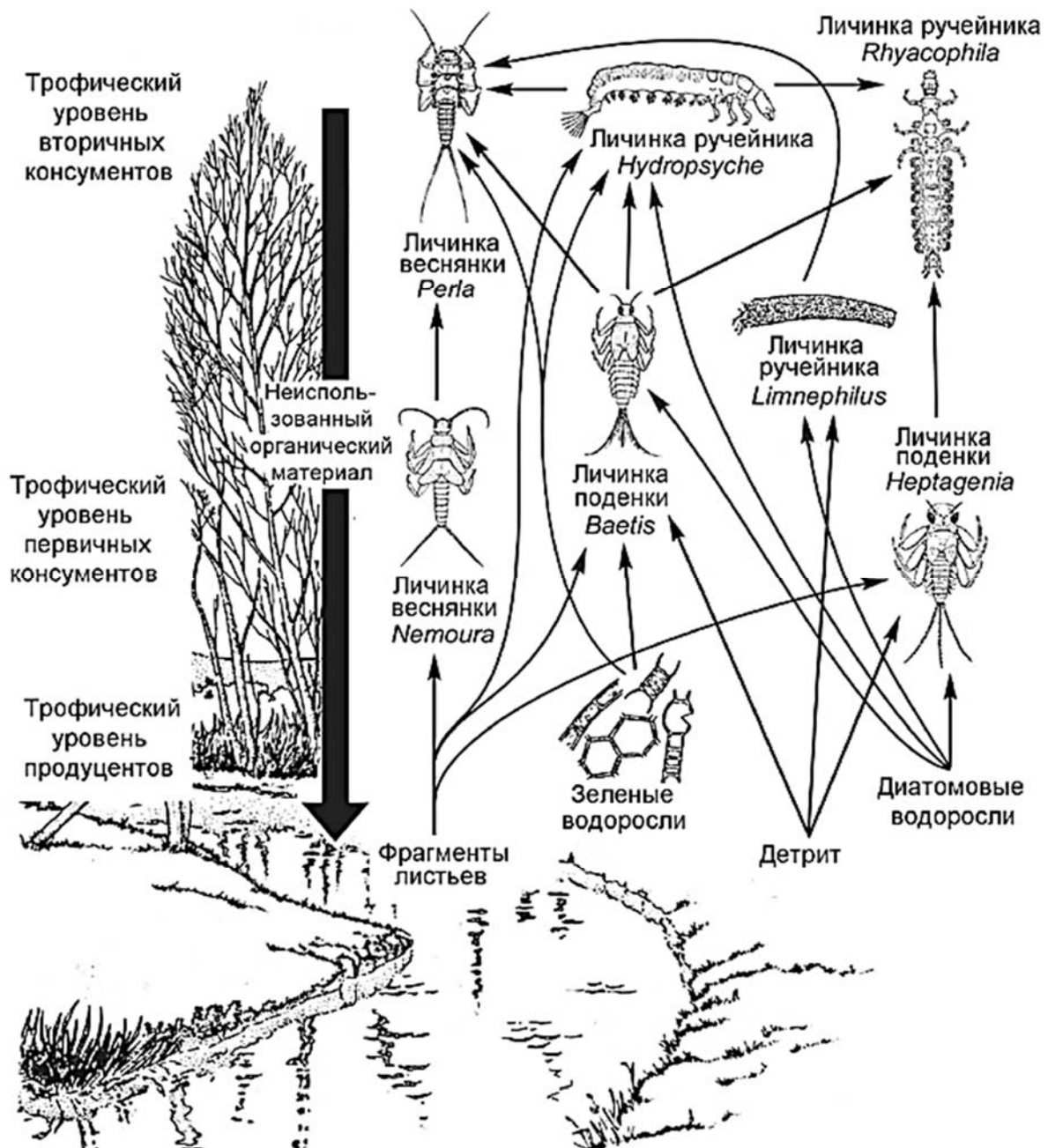


Рисунок 7.3 — Фрагмент пищевой цепи пресноводного водоема

Зная универсальную модель потока энергии, можно определить отношения величин энергетического потока в разных точках пищевой цепи. Выраженные в процентах, эти отношения называют экологической эффективностью. В зависи-

мости от задач исследования эколог изучает те или иные группы экологических эффективностей.

Первая группа энергетических отношений: B/R и P/R . Часть энергии, идущая на дыхание, т. е. на поддержание структуры биомассы, велика в популяциях крупных организмов (люди, деревья и др.). При сильном стрессе R возрастает. Величина P значительна в активных популяциях мелких организмов, например бактерий и водорослей, а также в системах, получающих энергию извне.

Вторая группа отношений: A/I и P/A . Первое из них называется эффективностью ассимиляции, второе – эффективностью роста тканей. Эффективность ассимиляции варьирует от 10 % до 50 % и больше. Она может быть либо очень мала, как в случае использования энергии света растениями или при ассимиляции пищи животными-детритофагами, либо очень велика, как в случае ассимиляции пищи животными или бактериями, питающимися высококалорийной пищей, например сахарами или аминокислотами.

Эффективность ассимиляции у растительноядных животных соответствует питательным свойствам их пищи: она достигает 80 % при употреблении в пищу семян, 60 % – молодой листовой, 30 %...40 % – более старых листьев и 10 %...20 % и даже менее – при поедании древесины, в зависимости от степени ее разложения. Пища животного происхождения переваривается легче, чем растительная. Эффективность ассимиляции у хищных видов составляет 60 %...90 % потребленной пищи, причем виды, поедающие насекомых, стоят на нижней ступени этого ряда, а питающиеся мясом и рыбой – на верхней. Причина такого положения заключается в том, что жесткий хитиновый наружный скелет, на который приходится значительная часть массы тела у многих видов насекомых, не переваривается. Это снижает эффективность ассимиляции у животных, которые питаются насекомыми.

Эффективность роста тканей варьирует менее значительно. Наибольших значений она достигает в тех случаях, когда организмы мелкие и условия среды, в которой они обитают, не требуют больших затрат на поддержание оптимальной для роста организмов температуры.

И наконец, третья группа энергетических отношений: P/B . В тех случаях, когда P оценивается как скорость, P/B представляет собой отношение продукции в конкретный момент времени к биомассе: $P/B = B/(B \cdot T)$, где T – время. Если рассчитывается интегральная продукция за некоторый промежуток времени, значение отношения P/B определяется с учетом средней за этот же отрезок времени биомассы. В этом случае отношение P/B – величина безразмерная; она показывает, во сколько раз продукция больше или меньше биомассы. Отношение продукции к биомассе можно рассматривать как внутри одного трофического уровня, так и между соседними.

Сравнивая продукцию P и биомассу B внутри одного трофического уровня, отметим своеобразный характер изменения P в определенном диапазоне изменений B . Например, на первом трофическом уровне продукция увеличивается сначала медленно, т. к. невелика поверхность листьев, затем быстрее и при большой плотности биомассы опять медленно, поскольку фотосинтез в условиях значительного затенения листьев нижних ярусов ослабляется. На втором и

третьем трофических уровнях при очень малом и при очень большом числе животных на единицу площади отношение продукции к биомассе снижается, главным образом из-за уменьшения рождаемости.

Отношение продукции предыдущего трофического уровня к биомассе настоящего определяется тем, что фитофаги, выедавая часть растений, тем самым способствуют ускорению их прироста, т. е. фитофаги своей деятельностью содействуют продуктивности растений. Аналогичное влияние оказывают на продукцию консументов первого порядка хищники, которые, уничтожая больных и старых животных, способствуют повышению коэффициента рождаемости фитофагов.

Наиболее проста зависимость продукции последующего трофического уровня от биомассы настоящего. Продукция каждого последующего трофического уровня возрастает при росте биомассы предыдущего.

Практическое задание

1 Используя интернет-ресурсы, найти необходимую информацию и рассчитать потоки энергии в агроценозе Могилёвской области при получении продукции животноводства (таблица 7.1, варианты).

Таблица 7.1 – Данные для выполнения практического задания

Вариант	Кормовая культура	Продукт животноводства
1	Ячмень	Яйцо
2	Овёс	Курятина (мясо бройлеров)
3	Пшеница	Курятина (мясо бройлеров)
4	Люцерна (сено)	Говядина (мясные породы)
5	Кормовая свёкла	Свинина
6	Картофель	Свинина
7	Кукуруза (зерно)	Яйцо
8	Кукуруза (силос)	Молоко коровье
9	Вико-овсяная смесь (сено)	Говядина (мясные породы)
10	Многолетние травы (сено)	Молоко коровье

Для этого необходимо:

- а) найти информацию о среднем количестве ФАР, приходящейся на 1 га сельскохозяйственных земель в Могилёвской области за вегетационный период;
- б) найти информацию о средней урожайности кормовой культуры в Могилёвской области;
- в) найти информацию о содержании энергии в 1 кг корма;
- г) определить количество энергии, «законсервировавшейся» на 1 га за вегетационный период;
- д) найти информацию о количестве энергии корма, необходимом для образования 1 кг продукции животноводства;
- е) рассчитать, какое количество продукции животноводства можно полу-

чить за счёт энергии корма, выращенного на 1 га в Могилёвской области (предполагается, что рацион животных сбалансирован по белкам, жирам, углеводам и другим веществам, необходимым для животного).

2 Отразить графически в виде потоковых диаграмм процесс преобразования солнечной энергии в энергию продукции животноводства.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое фотосинтетически активная радиация?
- 2 Какие параметры необходимо учитывать при расчёте потоков энергии?
- 3 Какая часть энергии передаётся на следующий трофический уровень?
- 4 Какие проблемы возникают при расчете потока энергии в системе с участием полифагов?

8 Практическая работа № 8. Оценка видового разнообразия древесной растительности парка (университетской территории)

Цель работы: ознакомиться с методами оценки видового разнообразия экосистем на примере древесной растительности парка.

Теоретическая часть

Понятие «биологическое разнообразие» впервые применил английский натуралист и путешественник Генри Уолтер Бэйтс в 1892 г. в работе «Натуралист на Амазонке». Однако основные научные концепции биоразнообразия были сформулированы в середине XX в. Используя математический аппарат «статистики разнообразия», англо-американский зоолог Джордж Эвелин Хатчинсон показал эффективность его применения в полевой экологии. Испанский эколог и морской биолог Рамон Маргалеф практически одновременно с американским орнитологом Робертом Мак-Артуром предложили методы количественной оценки разнообразия с теоретико-информационных позиций. Американский фитоценолог Роберт Хардинг Уиттекер структурировал уровни экосистемного разнообразия и исследовал зависимости биоразнообразия от факторов окружающей среды.

Биологическое разнообразие (biological diversity) – один из немногих общебиологических терминов, формулировка которого закреплена на уровне международных соглашений, в том числе при содействии Глобального экологического фонда. Биологическое разнообразие означает вариабельность живых организмов, включая наземные, морские и другие водные экосистемы и экологические комплексы, частью которых они являются. Это понятие включает в себя разнообразие в рамках вида, разнообразие видов и разнообразие экосистем.

Термин «биоразнообразие» обычно используется для описания числа, разновидностей и изменчивости живых организмов. В широком смысле этот термин охватывает множество различных параметров и является синонимом

понятия «жизнь на Земле».

Важнейшим показателем видовой структуры сообщества служит его видовое разнообразие. Оно зависит от видового богатства сообщества, которое выражается отношением числа видов в биоценозе к количеству особей (численности или биомассы).

Индекс видового богатства d Маргалефа (Margalef, 1958) рассчитывают по формуле

$$d = (s - 1) / \ln N,$$

где s – число видов;

N – число особей.

Сходный индекс предложил Менхиник (Menhinick, 1964):

$$d = s / \sqrt{N}.$$

В 1963 г. Маргалеф предложил другой индекс:

$$k = 1,443 \ln s / \sum n_i,$$

где n_i – численность отдельных видов на данном участке.

Большинство исследователей считают наиболее информативным индекс видового разнообразия Шеннона. Он предложен для оценки степени структурированности биоценозов как степень упорядоченности (информированности) системы (Shanon, Weaver, 1963):

$$H = - \sum (n_i / N) \cdot \log (n_i / N).$$

Следует учитывать, что информация о внутренней организации биоценоза объективно не сводится только к разнообразию. Под количеством элементов можно понимать численность особей, их биомассу и любые другие характеристики групп.

Индекс Шеннона обобщает значительней объем информации о численности и видовом составе организмов, учитывает число видов и степень их доминирования и широко используется в полевых экологических исследованиях. Однако для более глубокого понимания процессов взаимодействия между видами и их роли в сообществе требуется дополнительные данные о поведении, стратегии выживания и темпах возможного размножения конкретных видов.

В дальнейшем многие исследователи предлагали свои методы определения биологического разнообразия. Выделяют несколько форм биологического разнообразия, имеющих экологический смысл. Р. Х. Уиттекер сформулировал соответствующую систему терминов, представленную в таблице 8.1 и определяющую различные формы и типы экологического разнообразия с использованием греческого алфавита. В дальнейшем эта система классификации была дополнена и уточнена Ю. И. Черновым и рядом других авторов.

Таблица 8.1 – Формы и подходы к оценке экологического разнообразия по Р. Х. Уиттекеру

Инвентаризационный подход, формы разнообразия	Дифференцирующий подход, формы разнообразия
Альфа-разнообразие точечное – разнообразие в пределах небольшой единичной пробной площади или локального местообитания в пределах сообщества	Бета-разнообразие внутреннее (мозаичное, неоднородное, изменения между частями мозаичного сложного сообщества)
Альфа-разнообразие – внутреннее разнообразие местообитания для описания, представляющее однородное сообщество	Бета-разнообразие градиентное – разнообразие между различными сообществами вдоль градиента фактора среды
Гамма-разнообразие – для ландшафта или серии проб, при изучении более чем одного типа сообщества	Дельта-разнообразие – значительное в пространственном масштабе изменение видовой структуры сообщества вдоль климатообусловленных факторов среды
Эпсилон-разнообразие – для природной зоны (биома), крупных ландшафтов	Омега-разнообразие – разнообразие крупных биомов в зависимости от широтной зональности климатических, гидрологических и других параметров

В зависимости от поставленной задачи исследователь выбирает ту или иную методику оценки биоразнообразия или предлагает свою.

Практическое задание

Используя материалы, полученные при выполнении лабораторной работы № 2, оценить биологическое разнообразие древесной растительности парка по методам Маргалефа, Менхинника и Шеннона.

Контрольные вопросы

- 1 Что отражает понятие «биологическое разнообразие»?
- 2 Какие параметры используют при расчёте индексов биоразнообразия?
- 3 Какие преимущества имеет метод Шеннона?

Список литературы

- 1 **Дроздов, В. В.** Практикум по экологии : учеб.-метод. пособие / В. В. Дроздов. – СПб. : РГГМУ, 2019. – 256 с.
- 2 Методы исследований в экологии : краткий курс лекций / сост. Н. Н. Гусакова, Ю. М. Мохонько. – Саратов : Саратов. ГАУ, 2014. – 174 с.
- 3 **Рогова, Т. В.** Общая экология : учеб. пособие / Т. В. Рогова, Н. Р. Шафигуллина. – 2-е изд., перераб. – Казань : Казан. ун-т, 2023. – 79 с.
- 4 Структура и видовое разнообразие биоценозов : метод. указания / сост. О. И. Белякова, Д. Е. Татаренко. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т, 2019. – 15 с.
- 5 Экология : учебник и практикум / под общ. ред. А. В. Тотая, А. В. Корсакова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Юрайт, 2020. – 352 с.
- 6 **Щур, А. В.** Экология : учебник / А. В. Щур. – Рязань : ИП Викулов К. В., 2021. – 248 с.