И. Г. Пугачёва

МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

Допущено Министерством образования Республики Беларусь в качестве учебного пособия для студентов учреждений высшего образования по специальностям «Экология сельского хозяйства», «Биоэкология», «Природоохранная деятельность (по направлениям)»

Минск
РИВШ
2018

УДК 504.06(075.8)
ББК 28.088
П88

Р е ц е н з е н т ы :
кафедра общей экологии и методики преподавания биологии Белорусского государственного университета;
ведущий научный сотрудник лаборатории биоинформатики ГНУ «Объединенный институт информатики НАН Беларуси», кандидат технических наук, доцент *О. В. Красько*

Пугачёва, И. Г.

П88 Методы экологических исследований и моделирования экосистем : учебное пособие / И. Г. Пугачёва. – Минск : РИВШ, 2018. – 356 с.

ISBN 978-985-586-128-8.

В учебном пособии содержатся теоретические основы и подробное описание всех стадий экспериментальной экологической работы, начиная от этапа анализа литературных данных и предварительных исследований и заканчивая возможностями построения сложных математических моделей экосистемных процессов. В доступной форме и на конкретных примерах излагаются основные принципы научных исследований и основы закладки и проведения полевых опытов, методы описания статистической обработки данных, основы построения моделей экологических процессов и описания поведения систем. Содержится подробная теоретическая база в дополнение к лабораторному практикуму с тем же названием, изданным в 2017 г.

Адресуется студентам высших учебных заведений, обучающимся по биологическим, сельскохозяйственным и экологическим специальностям, магистрантам, аспирантам, специалистам-экологам, научным работникам в области сельского хозяйства.

УДК 504.06(075.8)
ББК 28.088

ISBN 978-985-586-128-8

© Пугачёва И. Г., 2018
© Оформление. ГУО «Республиканский институт высшей школы», 2018

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, несмотря на значительные успехи в развитии информационных технологий, прикладной математики, многообразие компьютерных программ для решения самых разных задач, скорость обработки больших объемов данных, сохраняется огромная пропасть между перечисленными возможностями и их использованием биологами (исследователями и специалистами в области сельского хозяйства, медицины, охраны окружающей среды, рационального использования природных ресурсов и др.). На эту проблему обращают внимание и другие авторы (см. Приложение).

Для эффективной реализации потенциала информационных технологий в управлении качеством окружающей среды, обоснованного принятия решений и управления социально-природным комплексом следует корректно собрать первичную информацию. На предварительном этапе работы важно освоить все необходимые для получения результатов методики, оценить состояние неконтролируемых внешних условий, исключить грубые погрешности измерений, проверить соответствие распределения результатов закону нормального распределения. После анализа отечественных и зарубежных литературных источников необходимо правильно спланировать и тщательно выполнить экспериментальный этап работы, при помощи статистических методов оценить величину случайных ошибок и выявить достоверность различий между изучаемыми вариантами, сформулировать правомерные выводы, а затем на основании полученных экспериментальных данных построить математические модели и обязательно проверить их на соответствие действительности. Если по каким-то параметрам результат отклоняется от реальности, нужно уточнить сделанные допущения и значения используемых величин. Модели служат фундаментом для принятия решений, позволяют оценить последствия тех или иных действий, дают возможность спрогнозировать и обосновать результат.

По большому счету, теория планирования экспериментов и статистические методы обработки результатов опытов нужны для того, чтобы научиться с наименьшими затратами времени, сил и средств получать максимум ценной объективной информации.

Современные слушатели на разных уровнях (от школы до вуза), даже если углубленно изучают, например, биологию, пытаются абстрагироваться от осмысления других (не нужных, по их мнению) учебных дисциплин, включая математику. При этом нарушается гармоничность системы образования в целом и резко ограничивается возможность аргументированно доказать свою точку зрения для конкретного слушателя в частности.

Так, Н. Винер еще в 1983 г. в книге «Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине» достаточно убедительно показал важность разностороннего образования: «Специализация дисциплин все время возрастает и захватывает все новые области. В результате создается сложный и запутанный клубок открытий, названий и законов. Существуют области научной работы, исследуемые с разных сторон чистой математикой, статистикой, электротехникой и нейрофизиологией. В этих областях каждое понятие получает особое название у каждой группы специалистов, и многие важные исследования проделываются трижды или четырежды. В то же время другие важные исследования задерживаются из-за того, что в одной области неизвестны результаты, уже давно ставшие классическими в смежной области.

Именно такие пограничные области науки открывают перед надлежаще подготовленным исследователем богатейшие возможности. Но изучение таких областей представляет и наибольшие трудности для обычного метода работы с разделением труда.

Если трудность физиологической проблемы по существу математическая, то десять несведущих в математике физиологов сделают не больше, чем один несведущий в математике физиолог. Очевидно также, что если физиолог, не знающий математики, работает вместе с математиком, не знающим физиологии, то физиолог не в состоянии изложить проблему в выражениях, понятных математику; математик, в свою очередь, не сможет дать совет в понятной для физиолога форме.

Доктор Розенблют всегда настойчиво утверждал, что действенное изучение этих белых пятен на карте науки может быть предпринято только коллективом ученых, каждый из которых, будучи специалистом в своей области, должен быть, однако, основательно знаком с областями науки своих коллег. При этом необходимо, чтобы все привыкли работать совместно, зная склад ума другого, оценивая значение новых идей коллеги, прежде чем эти идеи будут точно сформулированы. От математика не требуется умения провести физиологический эксперимент, но он должен уметь понимать такой эксперимент, уметь подвергнуть его критике и уметь предложить новый эксперимент. От физиолога не требуется умения доказать определенную математическую теорему, но физиолог должен быть в состоянии понять ее значение для физиологии и указать математику направление поисков. В течение многих лет мы мечтали об обществе независимых ученых, работающих вместе в одной из этих неисследованных областей науки, и не под началом какого-нибудь высокопоставленного администратора, а объединенных желанием, даже духовной необходимостью, понимать науку как нечто целое и передавать друг другу силу такого понимания.

На сегодняшний день математика является доказательной основой во всех областях знаний, поэтому любой специалист в биологии должен

пусть не доказывать математические теоремы, но понимать их пользу в своей области знаний»[1].

В настоящем учебном пособии описаны методы научных исследований, основные элементы методики полевого опыта, правила закладки и проведения полевого опыта, методы экологического мониторинга и оценки состояния окружающей среды, методы изучения лесных сообществ, значение системности исследований, некоторые статистические методы анализа результатов эксперимента, роль информации в современном обществе, понятия экологических и географических информационных систем и их использование в управлении качеством окружающей среды, методология системного анализа, использование математических моделей в системном анализе, принципы построения математических моделей в экологии, особенности оптимизационных моделей, моделирование роста в экологии, моделирование биоразнообразия, моделирование процессов дыхания и фотосинтеза у растений, модели распространения возбудителей болезней и вредителей, описание времени и климата в экологических моделях, принципы построения двухпоточных моделей, комплексная модель продукционного процесса растений, моделирование рисков и управление ими, математические модели некоторых сложных объектов.

Методическая разработка ориентирована на изучение методов исследования агроэкосистем с точки зрения экологии, на возможности их применения в сельскохозяйственных и экологических экспериментах. В ходе изложения материала происходит знакомство с системным анализом – упорядоченной и логической организацией данных и информации в виде моделей, которая сопровождается проверкой и анализом самих моделей, что необходимо для их верификации и последующего улучшения. Эта стратегия научного поиска использует математический аппарат для организации знаний о различных экологических системах, что позволяет выбрать вариант управления ими по принципу «максимум прибыли – минимум ущерба окружающей среде».

В пособии впервые объединен столь разносторонний материал в соответствии с программой изучения учебной дисциплины «Методы экологических исследований и моделирование экосистем», основанный преимущественно на проверенных временем классических примерах, предложенных специалистами в разных областях знаний за последние несколько десятков лет.

[1] *Винер, Н.* Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине / Н. Винер; пер. с англ. И. В. Соловьева и Г. Н. Поварова; под ред. Г. Н. Поварова. – 2-е изд. – М.: Наука, 1983. – 344 с.

ГЛАВА 1
МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОПЫТЫ В АГРОНОМИИ

1.1. Методы научных исследований

1.1.1. Краткая история развития научных исследований

Наибольший вклад в развитие методологии науки внесли античные мыслители. В Греции не было развито экспериментальное естествознание, но там был открыт аксиоматический метод, мастерски использованный Эвклидом в его знаменитых «Началах». Метод дедуктивных рассуждений применялся Аристотелем при построении теории силлогистики (первая в истории теория логического вывода, исследующая умозаключения, состоящие из так называемых категорических высказываний).

Наиболее эффективным способом систематизации накопленных знаний, поиска методов открытия новых научных истин греки считали метод дискуссий, в результате которых отсеивались ненадежные предположения.

В конце XIII–XIV в. в Италии и Франции постепенно складывается убеждение, что теории естественных наук имеют вероятностный характер. Поэтому и метод изучения таких проблем должен отличаться от математического. Все чаще используют обобщения, имеющие характер гипотез. Их правильность можно проверить только с помощью опытов. В школах Падуи и Парижа впервые осознается необходимость проведения специальных экспериментов. Наибольший вклад в разработку гипотетико-дедуктивного метода внесли последователи Аристотеля в Падуе (Якопо Забарелла и др.).

Методология науки начала формироваться в самостоятельную отрасль исследований в эпоху Возрождения, когда возникло экспериментальное изучение природы. Основоположником экспериментального метода исследования природы является Галилео Галилей. Он заменил дедуктивный метод античных исследователей экспериментальным, считал эксперимент важнейшим средством проверки и обоснования гипотез. Прежде чем поставить эксперимент, по его мнению, необходимо проанализировать имеющиеся факты, выяснить связь между ними, а затем сформулировать гипотезу. Правильность гипотезы обнаружится впоследствии, когда станут известны результаты опыта.

Методы Галилея были развиты Ньютоном в работах по классической механике, физике. Р. Декарт предлагал создать «всеобщую математику»,

основой которой должны были быть порядок, мера. Такой подход предлагался для изучения чисел, фигур, звезд, звуков и др. В отличие от Р. Декарта, Г. Лейбниц поставил задачу создать новую логику, которая помогла бы остальным наукам делать открытия и приводить доказательства. Г. Лейбниц надеялся свести всякое рассуждение, спор к вычислению.

На сегодняшний день в любой области человеческой деятельности трудно представить внедрение в производство новых продуктов или технологий без убедительного доказательства их полезности на основе анализа результатов специально запланированных опытов. Под статистическим планированием эксперимента понимают такую организацию исследования, которая позволит собрать необходимые данные, применить для их анализа статистические методы и сделать правильные и объективные выводы.

Инициатором применения статистических методов в планировании экспериментов является Рональд Фишер. В течение нескольких лет он был ответственным за статистическую обработку и анализ данных на Ротамстедской сельскохозяйственной опытной станции в Лондоне. Р. Фишер разработал и впервые применил дисперсионный анализ в качестве важнейшего метода статистического анализа в планировании экспериментов. Другим известным автором работ по планированию экспериментов был Фрэнк Йейтс.

Таким образом, методы планирования впервые начали использовать в сельскохозяйственных и биологических науках. Это определило основную терминологию (обработка, делянка, опыт, блок и др.) и послужило основанием для подробного их рассмотрения.

По словам И. А. Стебута, «сельскохозяйственный опыт также древен, как само земледелие. Накапливаясь веками, он был долгое время единственным источником сельскохозяйственных знаний, которые, таким образом, и по своему существу, и вследствие разобщенности человеческого общества в то время имели преимущественно местное значение» (из речи на первом Всероссийском съезде деятелей по опытному делу).

Старейшими опытными учреждениями в России и во всем мире можно считать аптекарские огороды, возникшие после организации в начале XVII в. Аптекарского приказа. Например, «Царев огород» в селе Измайлово под Москвой, созданный царем Алексеем Михайловичем. Это хозяйство было доведено до совершенства и являлось в то время подлинным училищем земледелия, садоводства и скотоводства, слава о котором разнеслась далеко за пределами России.

В конце XVI – начале XVII в. большая опытная работа была проведена по сельскохозяйственному освоению огромной территории Сибири. Это оказалось возможным за счет переноса в новые условия многовекового опыта крестьян из европейской части России.

В 1865 г. открылось «Вольное экономическое общество», которое в своих трудах давало подробные инструкции по постановке полевых опытов, обобщало накопленные сведения.

Важный вклад внес А. Т. Болотов – один из основоположников агрономической науки. Он исследовал почвы, изучал их плодородие, влияние удобрений, рационализацию обработки почвы, сортировку и очистку семян, посев сортовыми семенами, дал классификацию сорняков, внедрял новые культуры, улучшал сорта, впервые разработал помологическую систему и описал более 600 сортов, разработал метод прививки глазком (окулировка). Это был первый русский селекционер, который сознательно занимался выведением новых сортов яблони из семян, полученных от свободного переопыления отобранных материнских растений.

Профессор И. М. Комов предлагал закладывать в сельском хозяйстве многолетние опыты.

Во второй половине XVIII – начале XIX в. были и другие попытки по организации опытного дела как со стороны частных лиц, так и со стороны государства (организация «Образцовых усадеб», «Экспериментальных ферм» и т. п.).

Значительное место в организации опытного дела в России принадлежит М. Г. Павлову, который все свои идеи воплотил на опытном Бутырском хуторе под Москвой, которым он заведовал. Он говорил, что учить сельскохозяйственной науке, значит знакомить с вековой опытностью предшественников.

Начало научной постановки сельскохозяйственного опытного дела в России связывают с возникновением первого государственного опытного учреждения, которое было организовано в 1836 г. в Горках при Горы-Горецком земледельческом институте. Здесь изучались не только общеизвестные культуры, но и малоизвестные кормовые, «торговые и красильные» растения.

За рубежом первое опытное учреждение в 1835 г. создал француз Ж. Буссенго. Второй была открыта Ротамстедская сельскохозяйственная опытная станция в 1843 г.

Отмена крепостного права в 1861 г. оживила опытное дело, поскольку с внедрением новых приемов можно было извлечь больше выгоды. Так, сахарозаводчики довольно внушительные суммы вкладывали в развитие свеклосеяния.

Большая заслуга по постановке первых широкомасштабных опытов по обработке почв, удобрению их в различных почвенно-климатических условиях принадлежит Д. И. Менделееву, К. А. Тимирязеву, Г. Г. Густавсону. К. А. Тимирязев впервые организовал физиологическую лабораторию и тепличку для постановки вегетационных опытов.

Начали открываться опытные поля и станции: Полтавская, Энгельгардтовская, Богодуховская, Немерчанская и др.

А. Энгельгард в имении Батищево Смоленской губернии доказал, что на подзолистых почвах можно получать высокие урожаи, раскрыл роль фосфоритной муки и других удобрений, в том числе зеленого, применил севооборот вместо трехполки. Огромное значение он придавал связи науки с производством.

В 1901 и 1902 гг. состоялись съезды по опытному делу в Горках, которыми руководили И. А. Стебут и К. А. Тимирязев.

В 1908–1913 гг. широкое распространение получили коллективные опыты как весьма существенное дополнение к сети стационарных опытных учреждений. Они закладывались сельскохозяйственными учебными заведениями, сельскохозяйственными обществами, губернскими и уездными земствами. Главной причиной такого распространения коллективных опытов было широкое поощрение их Департаментом земледелия, с этой целью даже выдавались специальные субсидии.

Однако, несмотря на достижения и уже довольно широкую сеть, опытные учреждения в большинстве своем из-за плохого материального положения до Октябрьской революции влачили жалкое существование. Тогда в России было всего 44 сельскохозяйственные опытные станции и 170 опытных полей, в которых работало всего 440 научных работников вместе с техническим персоналом.

1.1.2. Современная организация сельскохозяйственной науки в Республике Беларусь

Отделение аграрных наук Национальной академии наук Беларуси (НАН Беларуси) создано в 2002 г. путем включения Академии аграрных наук Республики Беларусь в состав НАН Беларуси. Оно осуществляет координацию научных исследований и практического использования их результатов по важнейшим направлениям научного обеспечения агропромышленного комплекса: в области земледелия и растениеводства, животноводства и ветеринарной медицины, механизации сельского хозяйства, производства продовольствия, экономики и организации сельскохозяйственного производства.

Основные направления исследований и разработок организаций, закрепленных за отделением аграрных наук:

• разработка стратегии развития агропромышленного комплекса, организационно-хозяйственных механизмов ведения АПК, повышение продовольственной безопасности страны;

• создание высокопродуктивных, высококачественных и устойчивых сортов и гибридов сельскохозяйственных культур с использованием современных достижений науки, экономически обоснованных и эколо-

гически безопасных технологий производства продукции растениеводства, позволяющих максимально реализовать генетический потенциал растений, обеспечивающих снижение ресурсных затрат, рациональное использование природных богатств и охрану окружающей среды;

• разработка стратегии рационального использования почвенных ресурсов, эффективных методов защиты почв от деградации и воспроизводства плодородия почв на основе ресурсосберегающих и экологически приемлемых технологий, совершенствование технологий технической эксплуатации, ремонтов и реконструкции мелиоративных систем длительного сельскохозяйственного использования, разработка эколого-токсикологических принципов регулирования численности и снижения вредоносности особо опасных возбудителей болезней и сорняков путем использования новейшего ассортимента средств защиты растений;

• совершенствование и создание новых высокопродуктивных пород, типов и линий сельскохозяйственных животных, птицы и рыб на основе новейших методов селекции и биотехнологии, разработка и совершенствование экологически безопасных, энергосберегающих, экспортоориентированных технологий производства продукции животноводства, ветеринарных технологий, методов и средств диагностики, профилактики и терапии, обеспечивающих устойчивое санитарное благополучие;

• разработка новых и усовершенствование существующих технологий производства, заготовки, хранения и рационального использования кормов для сельскохозяйственных животных, направленных на обеспечение здоровья сельскохозяйственных животных, позволяющих реализовать генетическую продуктивность и обеспечивающих получение экологически чистой продукции животноводства высокого санитарного качества;

• разработка автоматизированных энергосберегающих технологий на базе современных технических средств и систем машин для отраслей растениеводства, животноводства и пищевой промышленности, научное обеспечение энергосбережения и эффективного использования энергии в технологиях АПК, разработка и освоение производства новых видов конкурентоспособной продукции пищевой промышленности, нормативной документации, сертификация продуктов питания, систем качества, современного оборудования для предприятий перерабатывающей промышленности.

В состав отделения аграрных наук входят пять научно-практических центров НАН Беларуси (по земледелию, по животноводству, по картофелеводству и плодоовощеводству, по механизации сельского хозяйства, по продовольствию) с дочерними предприятиями, а также Гродненский и Витебский зональные институты, Институт системных

исследований в АПК, четыре областные сельскохозяйственные опытные станции и Полесская опытная станция мелиоративного земледелия и луговодства.

По состоянию на 1 января 2015 г. в отделении аграрных наук состояло 11 академиков и 16 членов-корреспондентов НАН Беларуси, в закрепленных за ним организациях работало около 5600 человек, в том числе 1305 исследователей, 66 докторов и 421 кандидат наук.

1.1.3. Фундаментальные и прикладные исследования

Научное исследование – процесс изучения, эксперимента, концептуализации и проверки теории, связанный с получением научных знаний. Различают фундаментальные и прикладные научные исследования.

Фундаментальные научные исследования – экспериментальная или теоретическая деятельность, направленная на получение новых знаний об основных закономерностях строения, функционирования и развития человека, общества, окружающей природной среды. Результаты этих исследований используются для разработки технологий выращивания определенных культур. Исследования при этом обычно ведутся на грани известного и неизвестного, поэтому часто требуют от исследователя большого напряжения ума и интуиции, вклада больших материальных затрат.

Прикладные научные исследования – исследования, направленные преимущественно на применение новых знаний для достижения практических целей и решения конкретных задач. Эти исследования часто направлены на изучение факторов жизни растений и закономерностей связи между растением и средой, на создание перспективных сортов и гибридов, разработку эффективных приемов, повышение урожая и качества продукции. Конечная цель всех прикладных исследований – внедрение их результатов в практику. Разновидностью прикладных исследований являются поисковые исследования – поиск принципиально новых приемов возделывания сельскохозяйственных культур, создание комплексноустойчивых сортов и т. д.

1.1.4. Уровни исследований

Общая задача каждого научного исследования – познание законов природы, поиск путей и средств их использования в практической деятельности. Все исследования ведутся на трех взаимосвязанных уровнях: экспериментальном, теоретическом и описательно-обобщающем.

На экспериментальном уровне ставят эксперименты, накапливают факторы, анализируют их, обобщают и делают практические выводы.

Эксперименты на конкретных объектах называются физическими. Выделяют и мысленные эксперименты, т. е. логическое рассуждение о том, как изменится явление, процесс, если изменить условия, которые не могут быть осуществлены в действительности по техническим или другим причинам. Все эксперименты являются источником теоретических представлений.

На теоретическом уровне синтезируются знания, формируются общие закономерности в определенной области знаний.

Теория (от греч. *theoria* – учение) – форма достоверных научных знаний: 1) представляющая собой множество логически увязанных между собой допущений и суждений; 2) дающая целостное представление о закономерностях и существенных характеристиках объектов; 3) основывающаяся на окружающей реальности. Это мысленное отражение и воспроизведение действительности, в том числе и эксперимента.

Концепция (от лат. *conceptio* – ведущая мысль) – основополагающая идея теории. Критерии правильности научной теории – эксперимент и практика, т. е. теория используется для более глубокого понимания эксперимента, а эксперимент служит исходным материалом для создания теории.

На описательно-обобщающем уровне исследований описываются явления, происходящие в природе: наблюдения за ростом и развитием растений в зависимости от погоды, за прохождением фенологических фаз (морозостойкостью, засухоустойчивостью) и т. д. Для подобных наблюдений не требуются эксперименты, познание материального мира происходит путем наблюдений, накопления фактов и их использования. Познание ведется путем суждений и умозаключений.

Суждение – форма мышления, с помощью которой утверждают или отрицают что-либо.

Умозаключение – мыслительная операция, с помощью которой из связанных между собой последовательных суждений выводят новые знания.

1.1.5. Классификация и краткая характеристика основных методов исследований

Метод – способ познания явлений природы и общественной жизни с целью построения и обоснования системы знаний, т. е. это упорядоченная деятельность исследователя, направленная на получение новых знаний. Выделяют всеобщий, общенаучные и специальные методы исследований.

Всеобщий метод применяют на всех уровнях исследований: экспериментальном, теоретическом и описательно-обобщающем, это системный подход в науке.

Работая в любой области науки, изучая любой вопрос, исследователь обязательно использует всеобщий метод, который требует рассматривать явления, объекты, предметы и все результаты исследований в их связи, взаимодействии, взаимообусловленности (почва и растения); в движении и изменении (корни и надземная часть); во времени и пространстве (место на опытном участке); как переход количественных изменений в качественные (начало плодоношения); как борьбу противоположностей, которая ведет к развитию (растение и погода).

Общенаучные методы широко используются в науке и включают: выдвижение рабочих гипотез, эксперимент, наблюдение, анализ, синтез, индукцию, абстрагирование, конкретизацию, проведение аналогии, моделирование, формализацию, создание теории.

Выдвижение рабочих гипотез.

Гипотеза – научное предположение, выдвигаемое для объяснения некоторого явления и требующее верификации.

Конкурирующая гипотеза – альтернативное объяснение результатов исследования, которое с логической точки зрения не может быть верным, если верна исходная гипотеза.

Рабочая гипотеза – эмпирически не проверенное предположение, предсказывающее существование некоторой зависимости между переменными или объектами. Используется для выработки предварительного плана научного исследования.

Нулевая гипотеза – предположение об отсутствии взаимосвязи или корреляции между исследуемыми переменными.

Альтернативная гипотеза – предположение, принимаемое в случае отклонения нулевой гипотезы. Утверждает положительную связь между изучаемыми переменными.

Если гипотезы как новые предположения выдвигаются на основе уже известных знаний, то это будут обоснованные предположения. Например, каждый сорт плодовых, овощных и других культур имеет свои потенциальные урожайные возможности. Если сорт дает меньший урожай, то выдвигают рабочую гипотезу: возможно, недостаточен уровень минерального питания, и его следует повысить; режим влажности почвы не соответствует потребностям растений, и его надо изменить; необходимо увеличить число растений на гектаре и т. п. Каждую из этих гипотез выдвигают на основе того, что уже наблюдалось в практике. Если селекционеры предлагают новый сорт, то рабочая гипотеза о его перспективности выдвигается на основании характеристики этого сорта, которую дает госкомиссия по сортоиспытанию.

Кроме обоснованных гипотез, иногда выдвигают и простые догадки, которые возникают на основе интуиции, профессионального чутья исследователя с большим опытом работы. Наиболее вероятные, правдоподобные гипотезы проверяют в эксперименте.

Эксперимент – это научно поставленный опыт, при котором явление вызывают искусственным путем или активно и направленно воздействуют на изучаемый объект и процессы.

Исследователь ставит изучаемый объект в различные, заранее запланированные условия, и в этом заключается преимущество эксперимента. Существенно также, что изучаемые явления можно вызвать в любое время, не ожидая, пока они возникнут в природе: организовать полив, не ожидая дождя; с помощью удобрения восстановить питательный режим почвы, не ожидая, пока это произойдет естественным путем; обрезать деревья, не ожидая естественного самоизреживания ветвей и формирования кроны. Важно также, что в одном опыте можно искусственно вызывать не одно, а несколько явлений, расчленяя их в процессе проведения опыта и анализа результатов.

В эксперименте можно сравнивать не только отдельные элементы агротехники, но и целые технологии, например, интенсивную технологию выращивания культур с обычной, которая применялась раньше.

Эксперимент (опыт) является ведущим методом агрономических исследований. Чтобы выявить лучшие агроприемы или технологии возделывания той или иной культуры, используют наблюдение.

Наблюдение – метод сбора первичной информации путем непосредственной регистрации исследователем событий, явлений и процессов, происходящих в определенных условиях, т. е. внимательное изучение явлений эксперимента или природы, их количественная и качественная регистрация. Примеры наблюдений: определение даты распускания почек, цветения, завязывания плодов, роста побегов, листьев, созревания плодов, листопада и др. Наблюдают также за повреждением растений вредителями, поражением болезнями, морозо- и засухоустойчивостью, за динамикой питательного и водного режимов почвы, растений и т. п. Одно из главных наблюдений во всех экспериментах – учет урожая и его качества.

Все учеты и наблюдения необходимо проводить по методикам, соответствующим стандартам, пользуясь при этом приборами (весы, термометры, колориметры и др.), которые прошли необходимую проверку.

Наблюдения за явлениями природы включают учет атмосферных осадков, температур воздуха и почвы, влажности воздуха, числа солнечных дней, дат наступления первых заморозков осенью и последних весной, начала вегетации и цветения, их конца и т. д. В результате таких наблюдений можно сделать ценные выводы о пригодности тех или иных пород и сортов для новых зон, о возможности агроклиматического районирования плодовых и овощных культур.

Статистическое наблюдение – сбор сведений по заранее разработанному плану. Реализуется посредством отчетности по установленным

формам, в установленные сроки или посредством специально организованных обследований. В зависимости от количества единиц наблюдаемого объекта различают сплошные и несплошные (частичные) наблюдения. В зависимости от времени регистрации фактов – текущие (непрерывные) и прерывные наблюдения, последние подразделяют на единовременные и периодические.

Выборочное наблюдение – статистическое несплошное наблюдение, при котором из всей изучаемой совокупности отбирается определенное число единиц (выборочная совокупность), для которых регистрируются все интересующие статистику признаки и на основании которых исчисляют нужные показатели, распространяемые затем на исходную совокупность.

Лабораторное наблюдение – тип наблюдения, при котором сбор информации проводится в искусственно созданных для изучаемой группы условиях, контролируемых исследователем.

Полевое наблюдение – тип наблюдения, осуществляемый в естественных условиях реальной жизни.

Анализ (от греч. *analysis* – разложение) – мысленное или практическое расчленение предмета исследования (явлений и процессов) на составные части для более детального его изучения (составных частей, элементов).

Анализ служит отправной точкой прогнозирования, планирования, управления объектами и протекающими в них процессами. Так, весь опыт расчленяют на повторности, каждую повторность – на опытные делянки. Растения расчленяют на отдельные органы: корни, побеги, листья, цветки, плоды, которые анализируют раздельно. В плодах определяют содержание сахаров, кислот, витаминов и т. д.

Анализ как метод исследования используют только в соединении с синтезом.

Синтез (от греч. *synthesis* – соединение) – метод научного исследования, состоящий в познании объекта исследования в единстве и взаимосвязи его частей, т. е. это объединение расчлененных и проанализированных частей в единое целое для более полных выводов и обобщений.

Проанализировав данные по каждой повторности, исследователь выводит средние значения по каждому варианту, т. е. объединяет делянки с одинаковыми вариантами. Анализируя каждый вариант, он объединяет их в единый опыт, по которому делает выводы, обобщения и как конечный синтез – рекомендации производству. Таким образом, анализ и синтез, как диалектическое единство и противоположность, помогают лучше определить эффективность изучаемых агроприемов и явлений.

Индукция (от лат. *inductio* – наведение) – это метод, с помощью которого рассуждения ведутся от фактов к конкретным выводам; форма умозаключения от частного к общему. Так, при увядании листьев делают

вывод о недостатке влаги, при пожелтении – о нарушении минерального питания. Если в одном из вариантов опыта выявили самый высокий урожай и высокое качество плодов или ягод, то исследователь делает вывод о целесообразности внедрения этого варианта в производство.

Дедукция (от лат. *deductio* – выведение) – метод рассуждения от общих положений к выводам; форма умозаключения от общего к частному и единичному. Например, цветные рисунки листьев плодовых или других растений указывают на недостаток определенных элементов питания. Сравнение фактической окраски листьев с рисунками позволяет путем дедуктивного мышления прийти к выводу о недостатке конкретного элемента питания у определенных растений.

Абстрагирование – это теоретическое обобщение опыта или мысленное выделение главного, самых существенных связей при отвлечении от всех остальных.

Используют следующие типы абстрагирования: отождествление – для образования понятий о системе, о классах; изолирование – для выделения главного. Так, среди десятков вариантов опыта исследователь выделяет те, которые дают существенную прибавку урожая и улучшают его качество. Когда изучают образование органического вещества как результат сложных биохимических, физиологических и других процессов растения, осуществляемых с участием солнечной энергии, то, употребляя слово «фотосинтез», исследователь мысленно абстрагируется от второстепенных процессов и выделяет самое существенное в первичном создании органического вещества на Земле.

Обобщение опыта почвоведения и растениеводства привело к созданию теории почвообразовательных процессов, а обобщение науки и практики агрохимии и физиологии растений позволило путем абстрагирования создать теорию минерального питания.

Третий тип абстрагирования – абстракция идеализации. Это мысленное представление объектов или процессов, еще не существующих в реальном мире. При этом свойства мысленно изучаемого предмета или явления доводят до идеального значения. Например, хотят вывести сорт, комплексноустойчивый против всех болезней, вредителей, морозоустойчивый, засухоустойчивый, солеустойчивый, высокопродуктивный, с отличными качествами плодов. Абстракцию идеализации используют сначала для создания научной теории, а затем для осуществления ее на практике.

Конкретизация – метод исследования, с помощью которого от абстрактного переходят к конкретному. Выделив в создании органического вещества главный процесс – фотосинтез и познав его сущность, исследователь мысленно возвращается к конкретному растению, к его среде, рассматривает взаимодействие растения со всеми факторами жизни. Выделив путем абстрагирования минеральное питание как агро-

химический процесс, исследователь мысленно возвращается ко всем остальным процессам, в результате которых создается урожай.

Таким образом, методы абстрагирования и конкретизации тесно связаны между собой, дополняют друг друга и должны использоваться исследователем наряду с такими методами, как анализ и синтез, индукция и дедукция.

Аналогия (от греч. *analogia* – сходство) – метод познания неизвестных предметов и явлений на основании их сходства с известными.

Аналогия служит одним из источников научных гипотез. Например, в опыт вводят новый сорт яблони, о котором известно, что он по многим показателям аналогичен сорту Антей. Это значит, что новый сорт будет иметь такую же зимостойкость, устойчивость к болезням и вредителям, урожайность, такой же срок съема плодов, как и сорт Антей.

Метод аналогии, основанный на сходстве предметов и явлений, составляет основу моделирования.

Моделирование (от лат. *modulus* – образец) – метод, который состоит в замене трудно изучаемого предмета или явления на специально созданный аналог, на удобную модель, которая потом исследуется.

Для эффективности таких исследований каждая модель должна содержать существенные черты оригинала. Если модель сохраняет физическую природу оригинала, например, модель почвы, растительной клетки, органа, то она является физической. Если модель физически не создается, а ее оригинал лишь описывается соответствующими уравнениями, то модель является математической. Например, математическое описание урожая конкретного сорта плодовых культур или винограда в зависимости от факторов жизни. Моделированием являются также составление схемы опыта, вычерчивание размера и формы делянки, изображение на плане метода размещения вариантов и т. д.

Формализация – метод изучения объектов при помощи отдельных элементов их форм, отражающих содержание объекта. Это может быть, например, формула, описывающая объект.

Теория – метод, с помощью которого мысленно отражается и воспроизводится реальная действительность на основе данных практики и эксперимента. Это система взаимосвязанных знаний, позволяющая вскрывать основные закономерности развития изучаемого объекта с целью его преобразования в интересах человечества. Примеры теории как метода исследований: теория цикличности развития многолетних растений, теория обработки почвы, минерального питания растений и др.

Специальные методы исследований включают: методы математической статистики, инверсию, физические, химические методы, метод меченых атомов, картографический метод, методы социальной экологии, экспедиционный метод, метод морфологического анализа, биоло-

гические (лабораторный, вегетационный, лизиметрический, полевой) методы.

Методы математической статистики используют для объективного планирования опытов, подготовки экспериментальных данных к обработке, для определения достоверности опыта и его точности, выявления зависимости между учитываемыми в опыте показателями.

Инверсия – метод изучения объекта, явления под некоторым углом зрения или с точки зрения, противоположной той, с которой рассматривали раньше. Это нарушение обычного порядка рассмотрения объектов и явлений, соединение несовместимого, разделение неразделимого. Главное в методе инверсии – отказ от общепринятых взглядов и приемов в исследованиях. Например, возникла необходимость в разработке метода механизированного извлечения ядра ореха из скорлупы. При раскалывании и раздавливании снаружи, т. е. обычных способах, ядро крошится, засоряется скорлупой. Было предложено необычное решение: попытаться разрушить скорлупу изнутри сжатым воздухом. Орех прокалывают полой иглой, через которую внутрь скорлупы подают под давлением воздух. В результате скорлупа разлетается, а наколотое на иглу ядро подается на конвейер. Проблема была решена весьма эффективно, и метод успешно используется в производстве.

Еще один пример. Длительное время увеличение урожая плодовых культур достигалось в основном за счет увеличения габитуса деревьев и больших площадей питания – 10×10, 8×10 м. Дальнейшего увеличения урожая стали добиваться противоположным путем: уменьшением габитуса деревьев за счет использования карликовых подвоев и специальной формировки кроны, а также сокращением площади питания растений до 2×4 и даже 0,4×1 м в луговых садах.

Примером использования метода инверсии может служить обезвоживание, т. е. высушивание тканей для анализа путем вымораживания, а не воздействия высоких температур.

Физические и химические методы основаны на использовании физических приборов и химических анализов. Широко применяют метеорологические приборы, микроскопы, фотоэлектроколориметры, электровесы, радиоизотопную аппаратуру, фотоаппараты и т. д. Растения и почву исследуют с помощью агрохимических и биохимических анализов.

Метод меченых атомов – использование индикаторных доз изотопов для изучения процессов, протекающих в растениях и почве, в том числе таких, которые трудно или даже невозможно изучать обычными методами. Поведение изотопов в биологических системах идентично. Например, стабильный изотоп азота ^{15}N поступает в корни растений, передвигается в них и подвергается биохимическим превращениям, подобно стабильному азоту ^{14}N, который является одним из

элементов питания. Радиоактивный углерод ^{14}C усваивается листьями, хлорофиллом так же, как и стабильный изотоп ^{12}C, из которого строится органическое вещество растений. Для регистрации радиоактивных изотопов применяют радиометры и радиоавтографию, стабильных – масс-спектрометры.

Экспедиционный метод исследования чаще всего используют в плодоводстве и виноградарстве. При обследовании насаждений в различных хозяйствах изучают рост и развитие растений, их урожай, устойчивость к болезням и вредителям, морозо-, засухоустойчивость и другие показатели продуктивности в зависимости от сорта и условий среды. Автор данного метода – П. Г. Шитт [4]. Главное условие экспедиционных исследований – соблюдение правила единственного логического различия.

Основной учетной единицей служит пробная площадка из 400 плодовых растений, на которой выделяют по три типичных растения в каждой из трех групп: сильных, средних и слабых растений. Путем опроса специалистов, изучения документации хозяйств, а также обследования почв и насаждений изучают реакцию многолетних растений на почву, подпочву, уровень грунтовых вод, крутизну склона, его экспозицию, агротехнику. Основные учитываемые показатели: рост надземной части и корневой системы растений, отношение к болезням и вредителям, морозо- и засухоустойчивость, общее состояние, число плодовых образований и урожай в разрезе сортоподвойных комбинаций.

Результаты экспедиционных обследований позволили П. Г. Шитту дать рекомендации по подбору лучших мест для закладки крупных садов в 1930–1940-х гг., предотвратить организацию садоводческих хозяйств в неблагоприятных почвенно-климатических условиях, разработать важные теоретические положения.

Метод морфологического анализа – изучение морфологических структур растения с целью выявления наиболее существенных для исследования органов и частей. Так, одна из задач диагностики минерального питания – нахождение органа, по которому можно наиболее объективно определять потребность растений в элементах питания. Для этого анализируют содержание диагностируемых элементов в органах и частях растений и устанавливают, в каком из органов оно наиболее тесно связано с продуктивностью растений, качеством урожая и нормами вносимых удобрений. Аналогично устанавливают, по каким главным морфологическим признакам определять вид и сорт плодовых, овощных, цветочных растений и винограда. Таким образом, метод морфологического анализа позволяет решать важнейшие вопросы растениеводства.

К биологическим относят лабораторный, вегетационный, лизиметрический, вегетационно-полевой и полевой методы.

Лабораторный метод – это анализ растений и среды их обитания в лабораторной обстановке с целью: 1) изучения взаимодействия между растениями и условиями роста; 2) оценки качества урожая; 3) изучения обмена веществ растений; 4) изучения физических и микробиологических свойств почвы и т. д.

Лабораторные методы могут иметь самостоятельное значение, но чаще всего являются составной и нередко очень важной частью более широких агрономических исследований. Они дают возможность понять и объяснить сущность изучаемых явлений, сделать обоснованные выводы. Вес лабораторных исследований может быть различен. Они являются важным дополнением к другим опытам, углубляют исследование, дают возможность установить закономерности и сущность явления.

При планировании лабораторных исследований нужно учитывать, что они будут правильно характеризовать изучаемый объект только в том случае, когда проба, т. е. небольшая выборка, взятая для анализа, представляет и характеризует всю изучаемую совокупность. Ошибки, допущенные при образовании выборки, не могут быть компенсированы высокой точностью аналитической работы и полностью обесценивают данные иногда очень сложных и дорогостоящих лабораторных исследований.

Вегетационный метод – исследование растений, выращиваемых в специальных (вегетационных) сосудах в вегетационных домиках, теплицах, оранжереях и т. д. при строго контролируемых условиях внешней среды (питательный, водный, воздушный, температурный режимы, освещенность и др.) с целью изучения влияния этих условий на рост растений, урожай и его качество.

В зависимости от возраста растений используют сосуды объемом от 1 до 50 л. Сущность вегетационного опыта заключается в том, что растения выращиваются в искусственной обстановке, регулируемой экспериментатором. Объектами изучения служат почва, растения, удобрения. Сосуды могут быть железные, глиняные, керамические, стеклянные, пластиковые. Субстратами выступают почва, песок, вода. Сосуды должны быть размещены в укрытых местах.

Лизиметрический метод – исследование растений и свойств почвы в поле с целью изучения передвижения и баланса влаги, а также питательного режима в очень больших сосудах – лизиметрах, которые периодически взвешивают.

В зависимости от задач опыта высота почвы в лизиметрах может быть от 25 см до 2–3 м, чаще всего 1,0–1,5 м. Лизиметр заполняют насыпной почвой, т. е. почвой, в которой нарушено естественное строение, или помещают в него монолит, вырезанный из почвы по внутренним размерам лизиметра. В первом случае почву насыпают по горизонтам,

просеивая ее, смешивая и уплотняя до естественного объема. Лизиметры могут быть заняты как растениями, так и черным паром. Их необходимо размещать группами по темам исследований вблизи лабораторий для более удобного обслуживания и охраны и вкапывать в почву на уровень местности. Для сбора и изучения дренажных вод под лизиметрами оборудуют коридоры с освещением.

С помощью лизиметров изучают динамику влажности почвы и промывания атмосферных осадков, состав фильтрующихся вод, вымывание минеральных солей и удобрений, потери питательных веществ в процессе многолетнего удобрения, испарение влаги почвой и растением, баланс питательных веществ и влаги, водопроницаемость почвы и т. д.

Лизиметрический метод отличается от вегетационного тем, что исследования жизни растений и свойств почвы проводят в поле, в специальных лизиметрах, где почва отгорожена со всех сторон, с боков и снизу от окружающей почвы и подпочвы. Основное условие, определяющее конструкцию лизиметра, – приспособление, позволяющее изучать просачивание воды и растворенных в ней веществ. Мощность слоя почвы может варьировать в широких пределах – от глубины пахотного слоя до 1–2 м.

По конструкции лизиметры бывают бетонные, кирпичные объемом 1–2 $м^3$, металлические в виде воронки и т. д.

Дальнейшее сближение условий проведения сельскохозяйственного эксперимента с полевой обстановкой наблюдается в ***вегетационно-полевых опытах,*** которые проводят в поле в цилиндрических сосудах без дна. Почва здесь отделена только с боков.

Лизиметрические исследования не полностью приближены к полевым условиям, так как в лизиметрах почва снизу изолирована. Этот недостаток устраняется в вегетационно-полевом методе.

Вегетационно-полевой метод – выращивание растений в поле в металлических сосудах без дна (цилиндрах) с целью изучения эффективности удобрений, плодородия генетических горизонтов почвы, моделирования условий почвенной среды, метеорологических факторов и т. д.

Цилиндры высотой 50–100 см и более устанавливают в почву на 10 см выше уровня ее поверхности в той части сада, ягодника или овощного участка, где произрастает изучаемая культура или определенный сорт. При этом почва снизу находится в постоянном контакте с почвой естественного увлажнения и аэрации. Внутрь цилиндра высаживают растения. Согласно схеме опыта, на разную глубину вносят различные дозы удобрений или известь, гипс и т. д., варьируя условия среды. В контрольных цилиндрах поддерживают условия, свойственные данной почве. Таким образом, исследования ведут в обстановке, близкой

к естественной. Для изучения плодородия различных генетических горизонтов в цилиндры насыпают почву из определенных горизонтов, уплотняя и удобряя ее, как предусмотрено схемой опыта.

Наиболее полное представление о жизнедеятельности плодовых или овощных растений получают при использовании полевого метода.

Полевой метод (полевой опыт) – исследование, осуществляемое в природной (полевой) обстановке на специально выделенном участке, плодородие почвы и история которого хорошо известны и одинаковы, в целях установления количественного воздействия условий или приемов возделывания (отдельно взятых или в сочетании) на урожай сельскохозяйственных растений. Его основная задача – решать выдвигаемые сельскохозяйственным производством вопросы поднятия урожайности и качества сельскохозяйственной продукции.

Полевой опыт является завершающим этапом агрономических исследований, лучшие его результаты могут внедряться в производство. Задачами полевого опыта могут быть также подбор наиболее удобных конструкции садов и оптимальных площадей питания культур, выбор способа содержания почвы в садах и формирования кроны, изучение систем удобрения, обработки почвы и т. д. Он отличается тем, что культурное растение изучается вместе со всей совокупностью почвенных, климатических и агротехнических факторов, очень близких к производственным, или непосредственно в производстве. Только полевой опыт может установить связь между урожаем и средствами воздействия на него.

Полевые опыты имеют исключительное значение, поэтому их классификация и использование будут рассмотрены отдельно.

Список литературы

1. *Доспехов, Б. А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

2. *Моисейченко, В. Ф.* Основы научных исследований в плодоводстве, овощеводстве и виноградарстве / В. Ф. Моисейченко, А. Х. Заверюха, М. Ф. Трифонова. – М.: Колос, 1994. – 383 с.

3. *Рузавин, Г. И.* Методы научного исследования / Г. И. Рузавин. – М.: Мысль, 1975. – 237 с.

4. *Шитт, П. Г.* Метод и программа биологического обследования плодовых насаждений / П. Г. Шитт. – М.: Садвинтрест, 1930. – 125 с.

1.2. Основные элементы методики полевого опыта

1.2.1. Виды полевых опытов

Полевые опыты делятся на две большие группы: агротехнические и опыты по сортоиспытанию сельскохозяйственных культур.

Основная задача агротехнических опытов – сравнительная, объективная оценка действия различных факторов жизни, условий, приемов возделывания или их сочетания на урожай сельскохозяйственных культур и его качество. К этой группе относятся, например, полевые опыты по изучению обработки почвы, предшественников, удобрений, способов борьбы с сорняками, болезнями и вредителями, норм и сроков посева и т. д.

Опыты по сортоиспытанию, где при одинаковых условиях сравниваются генетически различные растения, служат для объективной оценки сортов и гибридов сельскохозяйственных культур. На основании этих опытов наиболее урожайные, ценные по качеству и устойчивости сорта и гибриды районируют и внедряют в производство.

Опыты по сортоиспытанию проводят НИИ и опытные станции, занимающиеся селекционной работой, а также сеть госсортоучастков и станций.

В зависимости от количества изучаемых факторов, длительности проведения и охвата почвенно-климатических условий полевые опыты могут подразделяться на однофакторные, многофакторные, единичные, массовые, краткосрочные, многолетние и длительные.

Если в опыте изучается действие только одного простого или сложного (составного) количественного фактора в нескольких градациях или ряда качественных факторов, то такие опыты называют ***однофакторными,*** или ***простыми*** (принцип единственного различия – дозы удобрений, пестицидов, полива и т. д.).

Опыты, в которых изучается действие двух или нескольких факторов (приемов), называют ***многофакторными,*** или ***сложными.*** В них определяется не только действие, но и взаимодействие изучаемых факторов, которое может быть как положительным, так и отрицательным.

Опыты называют ***единичными,*** если их закладывают в отдельных пунктах независимо друг от друга по различным схемам.

Если полевые опыты одинакового содержания проводят одновременно по согласованным схемам и методикам в нескольких различных географических (в масштабах страны, области, района), хозяйственных или почвенно-климатических условиях, и такие опыты объединены общей темой, их называют ***массовыми,*** или ***географическими.*** Их основная задача – проследить за действием изучаемого приема в разных почвенно-климатических условиях.

По длительности проведения полевые опыты делят на краткосрочные, многолетние и длительные.

Краткосрочные опыты проводятся в течение 3–10 лет для оценки действия или, в крайнем случае, одного последействия изучаемого приема. Если они нестационарные, то длятся, как правило, 3–4 года, стационарные закладывают на стационарных участках и проводят 4–10 лет.

При изучении севооборотов, монокультуры, системы удобрений и обработки, известкования необходимо несколько лет или ротаций севооборота. В подобных случаях ставят ***многолетние*** опыты. Их продолжительность – 10–15 лет.Такие опыты составляют особо важную группу методов агрономических исследований. Различают стационарные и нестационарные многолетние опыты. Первые закладывают и проводят в течение длительного времени на одном и том же месте, вторые закладывают ежегодно на новых участках.

Основная задача стационарного многолетнего опыта – изучение действия, последействия и взаимодействия систематически осуществляемых агротехнических приемов или их комплексов на продуктивность растений и плодородие почвы. Результаты таких опытов вносят существенные изменения в наши представления, сложившиеся на основе наблюдений и краткосрочных опытов. Такие опыты обычно проводят с систематическим внесением удобрений, они незаменимы при изучении физико-химических и биохимических процессов, медленно протекающих в почве и агрофитоценозах, расчетах баланса питательных веществ, учета потерь элементов питания и возможных масштабов загрязнения окружающей среды.

С 1950 до 1995 г. в Белорусской сельскохозяйственной академии (Беларусь, Могилевская область, г. Горки) на опытном поле «Иваново» был заложен многолетний опыт для изучения сравнительной эффективности навозной, навозно-минеральной и минеральной систем удобрений.

Опыты с продолжительностью более 50 лет называются ***длительными.*** Например, в Тимирязевской сельскохозяйственной академии (Россия, г. Москва) поддерживается монокультура овса (с 1912 г.), в Англии на Ротамстедской опытной станции – монокультура озимой ржи (более 100 лет).

По месту проведения различают полевые опыты, заложенные на специально организованных и приспособленных для этих целей участках или опытных полях, и полевые опыты, проводимые в производственной обстановке – на полях хозяйственных севооборотов.

Производственный сельскохозяйственный опыт – это комплексное, научно направленное исследование, которое проводится непосредственно в производственных условиях и отвечает конкретным задачам самого материального производства, его постоянного развития и совер-

шенствования. В его задачу входит изучение агротехнических и организационно-хозяйственных мероприятий, а не отдельных приемов или элементов этой системы.

1.2.2. Требования к научному эксперименту

К эксперименту предъявляют следующие требования: типичность и пригодность, использование перспективных сортов и агротехники, соблюдение правила единственного логического различия, а также принципа целесообразности и оптимальности, учет, кроме урожая, сопутствующих показателей, тщательное ведение необходимой документации, соблюдение достаточной точности, установление достоверности различий между вариантами, определение взаимосвязи между важнейшими показателями и др. Рассмотрим эти требования.

Типичность опыта. Опыты необходимо проводить в типичных для зоны, района и хозяйства условиях, на почвах, наиболее благоприятных для выращивания конкретных культур и распространенных в данной почвенно-климатической зоне, в данном административном районе или конкретном хозяйстве. Выполнение этого требования позволит дать рекомендации для всей территории, где размещаются типичные почвы. Однако если решается вопрос об улучшении других типов почв, об использовании неудобных крутых склонов, например, для садов, то опыты ставят и в нетипичных условиях.

Для опытов с культурами, корневая система которых распространяется на большую глубину (плодовые, орехоплодные культуры, виноград), должны быть типичными и одинаковыми уровень грунтовых вод и подпочва. Типичным для данной зоны и района, а также одинаковой экспозиции и крутизны должен быть склон: более ровный – в степи, небольшой – в лесостепи, более крутой – в горных районах Закарпатья, Крыма, Кавказа и т. д. Закладка одного и того же опыта на склонах разной крутизны и экспозиции недопустима.

В опыте необходимо придерживаться типичной для зоны агротехники, рекомендованной научными учреждениями. Однако, если в хозяйстве намечается переход к более перспективной технологии выращивания культур, следует использовать эту технологию.

Все работы в полевых опытах должны быть механизированы в соответствии с уровнем механизации в конкретном хозяйстве или районе. При этом желательно, чтобы уровень механизации был перспективным, как и уровень всей агротехники.

Таким образом, в опыте необходимо выдержать типичность почв и подпочв, уровня грунтовых вод, склона, его экспозиции, агротехники и уровня механизации.

Пригодность опыта означает соответствие земельного участка, посадочного и посевного материала, а также агротехники задачам опыта.

Например, под опыт выбраны типичные почва, подпочва, уровень грунтовых вод, склон. Цель опыта – изучить дозы азотно-фосфорно-калийных удобрений от 30 до 150 кг/га. А на всем участке в предыдущий год было внесено более 150 кг/га азота, фосфора и калия. Очевидно, такой участок непригоден, так как максимальные дозы удобрений в опыте меньше тех, которые уже внесены. На таком высоком агрофоне может не проявиться эффективность изучаемых доз удобрений, и выводы из опыта могут дезориентировать исследователя и обесценить опыт.

Еще пример. Для изучения влияния различной глубины обработки почвы под конкретную культуру планируют максимальную глубину вспашки 30 см, а в предыдущий год весь участок, отведенный под опыт, вспахивали на глубину 35 см или более. Очевидно, данный участок также непригоден для опыта. Перед закладкой опыта глубина обработки почвы на выбранном участке должна быть обычной, свойственной для поля овощного севооборота или конкретного сада, виноградника и не глубже той, которую планируется изучать.

Если предполагается изучать дозы пестицидов – инсектицидов, фунгицидов, гербицидов и др., то для опытов пригодны участки, где дозы препаратов в предыдущий год были не выше тех, которые планируются в опыте. Вносить пестициды следует в тихую, безветренную, нежаркую погоду, чтобы рабочий раствор не сдувался ветром на соседние делянки, а также не вызывал ожогов растений.

Использование перспективных сортов и агротехники. В производстве происходит постоянная замена сортов на новые, более урожайные и комплексно-устойчивые к болезням, вредителям и неблагоприятным условиям внешней среды. В связи с этим не следует брать в опыт сорт, который в ближайшие два-три года будет снят с производства и заменен более перспективным. В противном случае рекомендации исследователя могут оказаться бесполезными. Информацию о перспективных сортах можно получить на госсортоучастке и в госинспекции по сортоиспытанию, которая обслуживает определенную зону сельскохозяйственного производства.

Посевной и посадочный материал должен быть пригодным и однородным, т. е. иметь одинаковую всхожесть и чистоту семян, луковиц и клубней. Саженцы для всех вариантов и повторений опыта должны быть стандартными – с одинаково развитой как надземной, так и корневой системой.

Соблюдение правила единственного логического различия. В опыте можно изменять лишь тот фактор, который изучают, при строгом постоянстве всех других не изучаемых факторов и условий. Например, в опыте, где изучают нормы высева семян овощных культур, можно изменить только число высеянных семян на единицу площади. Все остальные элементы агротехники должны быть одинаковыми на всех

делянках опыта. При изучении глубины и сроков вспашки, междурядных обработок культур в садах и на виноградниках, доз удобрений и глубины их заделки, сортов и т. д. изменяют только эти отдельные факторы. В случае, когда изучают действие доз минеральных удобрений, а согласно агротехнике надо вносить еще и навоз, дозы его во всех вариантах опыта должны быть одинаковыми. Только тогда можно вычленить действие минеральных удобрений.

Соблюдение принципа целесообразности и оптимальности. Известно, что растения разных сортов плодовых, ягодных, овощных и других культур имеют различные размеры из-за разной силы роста. Например, сорт яблони Джонатан имеет крону в 1,5–2 раза меньшую, чем Ренет Симиренко, все сорта деревьев на карликовых подвоях имеют габитус кроны в несколько раз меньший, чем на сильнорослых. Поэтому деревья и сорта с малогабаритной кроной высаживают в производстве значительно гуще, чем сильнорослые. Шаблонно следуя правилу единственного различия, расстояния между деревьями в опытах как будто бы следует сделать одинаковыми для карликовых и сильнорослых деревьев. Но это будет противоречить здравому смыслу, идти вразрез с требованием оптимальной площади питания для сильнорослых и карликовых деревьев. Будет нарушен принцип целесообразности и оптимальности. Он будет нарушен и в том случае, если сорта ранних сроков посева высевать одновременно с сортами поздних сроков посева; если рано созревающие сорта убирать одновременно с поздно созревающими; если сильно реагирующие на удобрения сорта удобрять одинаково с остальными и т. д. Здесь сравнение сортов надо вести не при одинаковых, а при оптимальных условиях, соблюдая принцип целесообразности и оптимальности, творчески, а не шаблонно применяя правило единственного различия.

Учет, кроме урожая, сопутствующих показателей. Одна из главных задач опыта – не только выявить лучшие варианты, т. е. те, в которых получен наибольший урожай, но и объяснить причины повышения урожая в одних вариантах и снижения в других. А это возможно лишь тогда, когда наряду с урожаем изучают и другие показатели – физические, химические, микробиологические свойства почвы, динамику роста надземной массы и корневой системы растения, товарные качества урожая, содержание в плодах, ягодах, овощах сахаров, кислот, витаминов, белка и других веществ. В опытах с удобрениями желательно определять содержание элементов питания в растениях и почве, вынос питательных веществ растениями, коэффициент использования удобрений и т. д.

Однако в каждом опыте следует изучать лишь те показатели, которые необходимы для более глубокого познания явлений и процессов, влияющих на конечные и главные показатели – урожай и его качество.

Необоснованный учет других показателей может только создать дополнительные трудности, не внеся нового в результаты исследований.

Тщательное ведение необходимой документации. Одним из важнейших документов является план опыта, который включает научное обоснование темы исследований, схему опыта, метод размещения вариантов, методику учетов и наблюдений, календарный план выполнения работ.

Второй важный документ – первичные записи, которые ведутся непосредственно на месте проведения опыта в дневнике опытных работ. В хронологическом порядке отмечаются не только все выполненные работы и результаты опытов, но и особенности погоды. Здесь же указываются методики, по которым выполнялись те или иные работы.

Главную книгу опыта (журнал опыта) ведут в лаборатории. В нее записывают результаты всех исследований (переписывают из дневника), результаты анализов растений, почвы, качества урожая, математической обработки данных полевых исследований и лабораторных анализов. Для удобства записей разрабатывают соответствующие формы таблиц, где указывают схемы опыта, повторности, средние арифметические и другие данные.

Итогом каждого опыта является отчет о научно-исследовательской работе.

Достоверность опыта. Опыт будет достоверным, если его схема логичная, правильная и факториальная, т. е. включает все варианты, необходимые для того, чтобы получить полный ответ на поставленные вопросы, методика исследований соответствует целям и задачам эксперимента, а выбор объектов и условий исследований исходит из запросов производства.

Исследователь, изучающий агротехнику определенной культуры, должен хорошо знать ее биологию, водный, воздушный, питательный режимы и физику почвы, ботанику и другие смежные дисциплины. Изучая эффективность удобрения, необходимо владеть основами почвоведения, агрохимии, биохимии, микробиологии, физической и коллоидной химии. Но прежде всего следует как можно лучше познакомиться с объектом своих исследований, получить полную информацию по исследуемым вопросам, а этого можно достичь детальным изучением литературы.

1.2.3. Виды ошибок

Необходимо минимизировать ошибки, повышая точность опыта, т. е. степень близости его результатов к истинному значению, к объективной реальности. О точности опыта судят по обратной величине, т. е. по ошибкам.

Значительный ущерб точности опыта наносят грубые просчеты, промахи в работе. Например, можно неправильно записать массу урожая, ошибиться при снятии показаний прибора. Бывают случаи, когда на опытных делянках путают этикетки, дважды вносят удобрения, не на ту глубину обрабатывают почву и т. д. Из-за этого иногда приходится браковать отдельные делянки, повторения или даже весь опыт.

Для избегания возможных ошибок перед началом эксперимента необходимо провести подготовительную работу. В предварительных опытах надо не только освоить методики анализа и выбрать лучший способ записи результатов, но и убедиться в исправности всех приборов и оборудования. В них же оценивают возможную величину ошибок. Она окажет влияние на стратегию основного эксперимента, ориентируя на наиболее точное измерение тех величин, искажение которых вносит основной вклад в ошибку конечного результата.

Перед началом работы важно проверить, что те условия, которые сами собой разумеются, действительно соблюдаются: перед измерением убедиться в хорошей зачистке клемм электрических приборов, в горизонтальной установке весов, проверить, когда производилась калибровка приборов и проверка титра реактивов.

Через ошибки оценивается расхождение между характеристиками выборки и популяции, из которой была сделана выборка. Различают случайную (*random error*) и систематическую (*systematic error*) ошибки. При определении случайной ошибки предполагается, что ошибка регистрации данных (субъективная ошибка или человеческий фактор) равна нулю. Систематическую ошибку, которая появляется вследствие нарушения правил отбора, часто называют ошибкой, вызванной смещением. Общая ошибка складывается из случайной ошибки (вследствие случайных различий между элементами совокупности, включенными в выборку и не попавшими в нее) и из смещения (систематической ошибки), если оно существует.

Систематические ошибки – это постоянное завышение либо занижение результатов опыта под действием определенных факторов. Такими факторами могут быть закономерное изменение плодородия почвы в каком-то направлении, индивидуальное варьирование многолетних растений – плодовых, орехоплодных и ягодных, неисправность весов или других приборов и т. д. В связи с тем, что систематические ошибки однонаправленные, т. е. искажают результаты в одном направлении, они не могут взаимно погашаться и по этой причине влияют как на точность наблюдения над отдельными растениями, так и на средние арифметические по отдельным делянкам и вариантам. Уменьшить систематические ошибки можно путем правильного планирования, закладки и проведения опыта.

Систематические ошибки присутствуют в любом опыте, против них статистика бессильна. Причины систематических ошибок:

• неточные измерительные приборы, небрежно приготовленные или старые реактивы, что преодолевается своевременной калибровкой и проверкой титра растворов;

• реальная обстановка опыта, в чем-то отличающаяся от запланированной. Так, в многолетнем эксперименте в качестве систематической ошибки выступают климатические особенности каждого года. Именно сглаживание этой систематической ошибки и вынуждает нас проводить многолетние испытания новых сортов;

• дрейф условий. Многие показатели могут плавно изменяться в ходе опыта. Так, при манометрическом измерении интенсивности дыхания результат будет искажаться изменением атмосферного давления в комнате при перемене погоды;

• сам наблюдатель с особенностями его характера и здоровья, поэтому каждую серию наблюдений должен проводить один экспериментатор, а проверочное повторение эксперимента полезно полностью передоверить другому.

Экспериментатор должен рассматривать себя как некоторый элемент опыта, который также вносит погрешности в конечный результат. Именно по этой причине необходимо выяснить, какие цифры экспериментатор склонен избегать при глазомерной оценке, в какое время суток он работает наиболее качественно.

Человек делает меньше ошибок, когда чувствует себя комфортно. Поэтому приборы, с которых снимаются показания, должны быть удобно расположены. Важно обеспечить хорошее освещение рабочего места, каждое измерение повторить еще хотя бы раз. Это поможет избежать ошибок при снятии показаний приборов и записи и позволит оценить ошибку измерения. Когда результаты двух измерений сильно расходятся и ясно, что один из них ошибочный, необходимо провести дополнительные измерения.

В полевом опыте следует по возможности организовать комфортные условия для работы и отдыха. Если экспериментатор целый день проведет на солнцепеке или ему некуда будет скрыться от дождя, его наблюдательность снизится. В еще большей степени это относится к работе в условиях экспедиции;

• эффекты, неизвестные в силу неполноты наших теоретических знаний.

Случайные ошибки – обусловлены неизвестными, непредвиденными факторами и поэтому неизбежны. Они появляются под влиянием случайного варьирования плодородия почвы или самих многолетних растений, могут завышать или занижать результаты исследований, т. е. они разнонаправлены. Существенно, что случайные ошибки взаимно

компенсируются, поэтому с увеличением числа наблюдений погрешности опыта уменьшаются. Методы математической статистики позволяют определить величины случайных ошибок и вычленить их из общего варьирования экспериментальных данных в том случае, если эти данные не содержат грубых и односторонних систематических ошибок.

Заметим, что ошибки опыта не представляют собой ошибок расчета, они определяют величину отклонения фактического значения от истинного. Для повышения точности опыта рекомендуется увеличивать число повторностей, тщательно подбирать варианты, совершенствовать технику опыта, правильно отбирать экспериментальный материал, планировать и группировать экспериментальные единицы.

1.2.4. Элементы методики полевого опыта

Основными элементами методики полевого опыта являются: число вариантов и повторений, площадь и форма делянок, их ориентация на местности, метод расположения вариантов на земельном участке, система размещения повторений, делянок и вариантов на территории, метод учета урожая, организация опыта во времени. Правильное сочетание всех элементов методики обеспечивает максимальную точность и типичность опыта, т. е. его репрезентативность в конкретных условиях.

Основная задача рационального сочетания основных элементов методики – возможное уменьшение различий в исходном плодородии сравниваемых делянок, обусловленных пестротой почвенного покрова.

1.2.5. Схема полевого опыта и требования к ней

Схема опыта представляет собой совокупность опытных и стандартных вариантов. Под опытным вариантом понимают изучаемое растение, сорт, условия возделывания, агротехнический прием или их сочетание. Один или несколько вариантов, с которым сравнивают опытные, называют контролем или стандартом.

Число вариантов в опыте – обычно заданная величина, не влияющая на типичность опыта, но существенно оказывающая влияние на точность опыта, так как при прочих равных условиях опыт с большим числом вариантов будет занимать большую площадь.

Увеличение числа вариантов в опыте сверх 12–16, как правило, снижает точность опыта. Характерно, что при более крупных делянках увеличение числа вариантов значительно сильнее снижает точность опыта, чем при меньших размерах. С увеличением площади возрастают и пестрота почвенного плодородия, и расстояние между сравниваемыми вариантами, поэтому в данном случае трудно уложить опыт в пределах однородной по почвенному плодородию площади.

Опыт с большим числом вариантов (16–20) требует, как правило, специальных методов постановки, а при 2–3 необходима более высокая повторность, чтобы иметь достаточное число наблюдений для правильной оценки ошибки опыта. Поэтому при разработке схемы опыта нужно, чтобы число вариантов было не более 12–16, а делянок – 60–64. Однако часто на первых этапах селекционного процесса, а также в Государственном испытании приходится работать с большим числом вариантов, которые требуют более сложных методов постановки, например, введение в каждое повторение 2–3 контрольных, использование метода расщепленных делянок, решетки, шахматного метода и т. д.

1.2.6. Площадь, форма, направление делянок

Делянка – это часть опытного поля, на котором расположен вариант. В опыте все делянки должны быть одинаковыми по размеру и иметь прямые углы. Полевой опыт ставят на делянках, имеющих определенный размер и форму. Они служат для размещения контрольных и опытных вариантов.

Довольно часто размеру делянки придают особо пристальное внимание. Так, в 1930-х гг. увлекались большими делянками (до 1 га и более), и это, кроме снижения точности исследований и увеличения затрат, ничего не принесло. Мелкие делянки дают возможность проводить исследования экономнее, быстрее и в большем объеме.

Установлено, что точность опыта повышается по мере увеличения делянки до 100 м^2, в дальнейшем – совсем незначительно, а за некоторым пределом точность опыта даже снижается.

С увеличением размера делянки возрастает общая площадь опыта, и он выходит за пределы выбранного для него однородного участка. Перекрыть микропестроту почвы увеличением размера делянки практически невозможно.

Размер опытной делянки для различных видов полевого опыта в каждом конкретном случае будет меняться в зависимости от назначения и задачи опыта, культуры, степени и характера пестроты почвенного покрова, агротехники и от того, какими орудиями, машинами предполагается пользоваться и возможна ли одновременная обработка всех делянок или их придется обрабатывать раздельно. Целесообразно на делянках использовать максимальную механизацию.

В настоящее время в опытном деле наиболее широко используются делянки размером 50–100 м^2, а на первоначальных этапах исследовательской работы – 5–25 м^2. Делянки меньше 10 м^2 применяют в микрополевых опытах при селекции растений, когда очень важно экономить посевной материал.

На размер делянки оказывают влияние ширина междурядий, густота стояния растений, ширина захвата техники.

Для пропашных культур минимальная делянка должна иметь минимум 80–100 растений. По данным некоторых авторов, для картофеля достаточно 40–50, а для кукурузы – 60 учетных растений. Общее правило таково: чем больше выращивается растений на единице площади, тем меньше может быть площадь делянки.

Исходя из мирового опыта, наиболее целесообразно использовать размеры делянок в 50–100 м^2. Отклонение зависит от культуры, технических условий, удобства проведения, задач и агротехники.

В селекционной работе, особенно на первых стадиях, когда существует ограниченное количество семян, с успехом используются делянки размером 0,5–2 м^2, а в малых (предварительных) сортоиспытаниях – 5–10 м^2, и при очень тщательной обработке получают высокую точность опыта. Конкурсное испытание обычно проводят на делянках размером 25–100 м^2.

При изучении способов обработки почвы, требующих применения отдельных орудий, а также при проведении многолетних опытов площадь увеличивается до 300–1000 м^2, чтобы в дальнейшем методом расщепленных делянок учесть другие факторы, которые раньше не были заложены в программе исследований.

Плодовые и овощные культуры имеют довольно высокий нижний предел площади делянки: она должна быть достаточной, чтобы индивидуальная (генетическая) изменчивость растений не оказала существенного влияния на ошибку опыта. Например, плодовых деревьев на делянке должно быть не менее 6–10, кустарниковых – 10–20, поэтому делянка может значительно отклонятся от 100 м^2.

Таким образом, полевые опыты следует ставить на делянках сравнительно небольшого размера, дающих возможность нормально проводить все агротехнические работы. Поэтому создание и серийное производство малогабаритной техники для экспериментальных работ в поле – один из важнейших факторов повышения производительности и эффективности сельскохозяйственных исследований.

Говоря о форме делянки, обычно имеют в виду отношение ее длины к ширине. Бывают делянки:

- квадратные (соотношение сторон равно 1: 10×10, 5×5 м и т. д.);
- прямоугольные (соотношение длины и ширины больше 1, но меньше 10: 5×20, 4×20 м);
- удлиненные (соотношение больше 10: 2,5×40, 4×60 м).

Данные рекогносцировочных посевов позволили установить, что длинные узкие делянки полнее охватывают пестроту земельного участка и обеспечивают большую точность опыта, чем квадратные. При этом наиболее целесообразно иметь отношение 1:10 – 1:15.

Удлиненная форма оказывается наиболее рациональной при больших размерах делянок и при закладке опыта на склоне, когда можно ожидать заметного изменения плодородия. В последнем случае длинные, узкие делянки необходимо располагать вдоль склона так, чтобы каждая из них захватывала все его элементы.

Существенным недостатком длинных делянок является их большой периметр в сравнении с квадратными и прямоугольными, что приводит к выделению большой площади для устранения краевых эффектов, а площадь защитных полос будет значительно больше, чем с другой формой.

Ширину делянок целесообразно устанавливать кратной ширине рабочих захватов сельскохозяйственных машин, особенно посевных и уборочных. Эффект от удлиненной делянки наиболее сильно проявляется при больших размерах, в сложных схемах, когда расстояние между делянками может быть значительным.

Квадратная форма делянки предпочтительнее прямоугольной и удлиненной в опытах, где смежные варианты могут сильно влиять друг на друга. Например, при внесении ядохимикатов возможен их снос, поэтому нужны большие боковые защитные полосы, что ведет к сильному сокращению учетной площади и увеличению общей площади опытного участка при удлиненных делянках. При этом нужно помнить, что из центра делянки квадратной формы вредителям и грибам труднее мигрировать на соседние варианты, так как путь их длиннее, чем из других форм.

При наличии в схеме 8–10 вариантов и размеров делянки до 100 м^2 предпочтительнее всего прямоугольная форма.

Точность опыта во многом зависит от направления делянок, т. е. ориентации их на опытном участке. Участок должен быть ровным, склон не должен превышать 3 °.

Сравнение изучаемых вариантов будет правильным, если опытные делянки располагать длинной стороной в том же направлении, в каком сильнее всего изменяется плодородие почвы. При любой другой ориентации делянок они в разной степени будут охватывать изменчивость плодородия земельного участка, что отрицательно скажется на точности опыта и затруднит объективную оценку его размеров.

По такому же принципу закладывают опыт на полях с полезащитными лесными полосами: делянки располагают длинной стороной перпендикулярно к лесной полосе.

При изучении болезней плодовых и ягодных культур делянки располагают длинной стороной вдоль ряда, так как многие болезни распространяются вдоль рядов через сомкнутые кроны, и болезнь можно ограничить на делянке, на которой она началась.

На выровненном участке по плодородию направление делянок не влияет на точность опыта.

1.2.7. Виды защитных полос

Площадь делянок делится на общую, защитную и учетную. С защитной полосы (защитки) урожай не учитывают и убирают в первую очередь. Когда говорят о площади делянок, то говорят об учетной площади.

Боковые защитки выделяют вдоль длинных сторон делянок для исключения влияния растений соседних вариантов, краевых эффектов (орошение, внесение удобрений, гербицидов и т. д.). Чаще боковая защитка составляет 0,5–1,5 м, при орошении, внесении гербицидов – 2–3 м и более.

В опытах по сортоиспытанию влиянием растений соседних делянок пренебрегают и боковые защитки не выделяют. Для разграничения изучаемых сортов между делянками оставляют узкие незасеянные полосы шириной 20–40 см.

Концевые защитки шириной не менее 2 м выделяют для предохранения учетной части делянки от случайных повреждений. Для разворота сельскохозяйственных машин и орудий с обоих концов делянок отделяют защитные полосы шириной не менее 5 м.

В опытах с плодовыми и ягодными растениями на защитные полосы (защитки) отводят один или несколько рядов деревьев, кустов или лент малины и земляники. Защитные ряды создают как вокруг опытных делянок (внутренние защитки), так и вокруг всего опытного участка (внешние защитки). Внутренние защитки предотвращают взаимное влияние соседних вариантов, внешние защищают делянки от потрав животных, наезда транспорта, придорожной пыли и уравновешивают воздействие на опыт его неоднородных окраин. На внешние защитки отводят больше рядов растений, чем на внутренние.

Если окраины опытного участка на торцовых частях делянок одинаковые – одна и та же защитная или ветроломная полоса, одна и та же дорога или открытая местность, то защитки не обязательны. При этом, однако, повторения размещают в один или максимум в два яруса с одинаковым числом повторений в каждом ярусе.

Внутренняя защитка в опытах с плодовыми культурами, как правило, состоит из одного ряда деревьев. Опыты без защиток нежелательны даже при изучении обрезки, особенно если степень обрезки разная, так как при этом будет меняться не только освещенность деревьев, но и другие факторы их жизни.

Защитки необходимы и в опытах с удобрениями.

Расширять междурядья для увеличения защитного пространства в саду или же пропускать ряды на том месте, где должна быть защитка, недопустимо. Это будет методической ошибкой, ибо изменится не только площадь питания деревьев, но и все зависящие от нее условия. С каждой стороны защитных рядов выполняют те же агротехнические приемы, что и на прилегающей к защитке делянке.

В опытах с пестицидами число защитных рядов увеличивают до двух-трех для того, чтобы предотвратить распространение вредителей и болезней и устранить перенос препаратов на соседние делянки.

Если опыт закладывают одновременно с посадкой сада, в защитных рядах рекомендуется высаживать растения сорта, который является хорошим опылителем учетных сортов. Если опыты закладывают в насаждениях, посаженных ранее планируемого опыта, защитные ряды и опытные делянки делают с учетом фактического насаждения.

Общее требование ориентации – делянки необходимо располагать длинной стороной в том направлении, в каком сильнее всего изменяются не изучаемые в опыте условия жизни растений, например, плодородие почвы земельного участка, господствующие ветры, действие лесополосы, изгороди и т. п. Это общее требование следует соблюдать всегда, кроме специальных опытов по изучению эрозии почвы и влияния склонов разной крутизны.

1.2.8. Повторность и повторение

Данные полевого опыта получают с теми или иными случайными ошибками, обусловленными невыравненностью почвенного плодородия, индивидуальными различиями растений, случайными повреждениями и поражением их болезнями и вредителями, а также ошибками технического характера.

Согласно теории случайных ошибок, положительные и отрицательные ошибки возникают одинаково часто и при большем числе повторных наблюдений могут компенсироваться. Следовательно, чтобы получить точное представление об истинном урожае растений того или иного варианта, необходимо делянку с этим вариантом повторить несколько раз.

Повторностью опыта на территории называют число одноименных делянок каждого варианта, а повторностью опыта во времени – число лет испытаний новых агротехнических приемов или сортов. Территориальная повторность дает возможность полнее охватывать каждым вариантом опыта пестроту земельного участка и получить более устойчивые и точные средние, а повторность во времени позволяет установить действие, взаимодействие или последействие изучаемых факторов в разных метеорологических условиях.

При увеличении повторности заметно снижается ошибка опыта. Особенно сильно она снижается при увеличении повторности до 4–6-кратной, дальнейшее увеличение повторности сопровождается менее значительным уменьшением ошибки.

Средние урожаи, вычисленные по результатам нескольких повторных делянок, всегда более устойчивы и точны, чем поделяночные.

Повторение – часть опытного участка, на котором расположена вся схема опыта.

Эффективность повторности особенно четко проявляется, если целые повторения, т. е. весь набор изучаемых вариантов опыта, располагать в пределах даже сильно различающихся, но достаточно однородных внутри себя частей земельного участка.

1.2.9. Методы размещения повторений и вариантов

Методика не допускает разрыва повторения, а схема опыта с полным набором вариантов составляет организованное повторение. Повторение, взятое в отдельности, представляет, в сущности, самостоятельный опыт и позволяет делать всевозможные сравнения между вариантами, так как различия в плодородии почвы внутри повторения меньше, чем между повторениями.

Метод размещения – это определенное чередование вариантов на опытных делянках в зависимости от задач и конкретных условий опыта. Как правило, плодородие почвы в различных местах опытного участка не однородно, оно варьирует либо случайно, либо закономерно. Еще сильнее варьируют урожай и другие учитываемые показатели при выращивании многолетних растений – плодовых и ягодных. Если это не учитывать, то одни варианты окажутся в лучших, другие – в худших условиях. В результате правило единственного логического различия нарушится и весь опыт будет поставлен под сомнение.

Исследования в садах и на виноградниках осложняются и колебаниями урожая по годам и вариантам. Поэтому необходимо повторять опыт не только в пространстве, но и во времени (по годам).

Повторения на опытном участке могут располагаться в один, два, три и более рядов (ярусов, поясов). Одноярусное расположение более желательно с точки зрения техники проведения опыта. Многоярусное расположение повторений применяют при большом числе вариантов и делянок в опыте, а также при ограниченном участке.

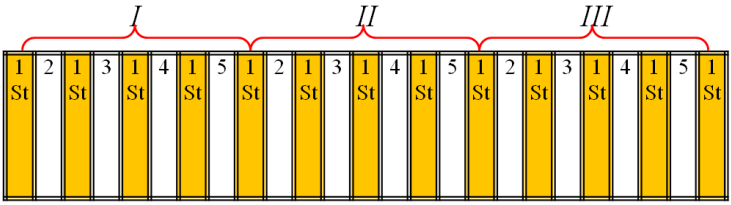
Варианты в повторении размещают различными методами, из которых стандартный, систематический и случайный (рандомизированный) являются основными (рис. 1).

В мелкоделяночных опытах, когда необходима высокая точность в определении прибавки урожая, может быть использовано многорядное размещение всего опыта с шахматным расположением стандартных вариантов.

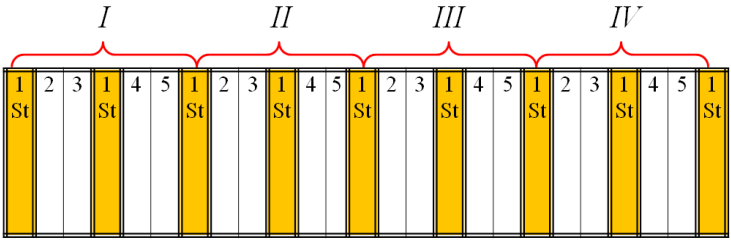
Стандартный метод – размещение контроля (стандарта) рядом с каждым опытным вариантом. Это один из первых методов, которым начали пользоваться экспериментаторы. Размещение стандарта через один вариант называют *ямб-методом.* При этом под стандарт (контроль)

Стандартный

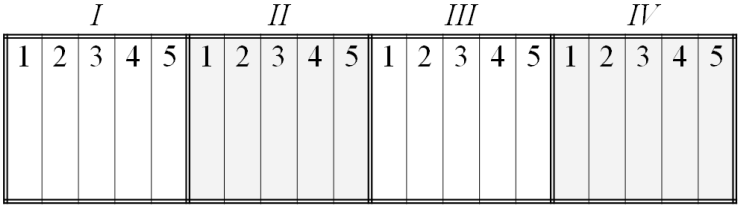
Ямб-стандарт



Дактиль-стандарт



Систематический



Рандомизированный

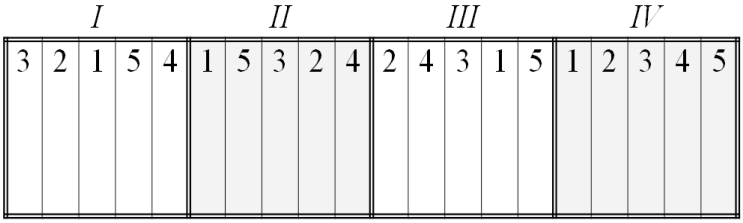


Рис. 1. **Методы размещения вариантов**

отводится половина опытных делянок, т. е. довольно большая площадь. Для ее уменьшения до одной трети используют *дактиль-метод* – размещение контрольных делянок через две опытные.

И при ямб-методе, и при дактиль-методе опыт должен не только начинаться, но и заканчиваться стандартом.

Стандартные методы размещения вариантов могут использоваться в сортоиспытании, где они впервые и были рекомендованы. Их применяют, когда семян нового сорта или гибрида очень мало. Эти методы весьма эффективны при большой пестроте плодородия почвы и других условий выращивания, так как каждый вариант контролируется расположенным рядом стандартом.

Недостатки стандартного метода:

• не всегда наблюдается корреляционная зависимость между урожаями рядом расположенных делянок (об этом говорят данные дробных учетов рекогносцировочных посевов);

• очень трудно сравнивать опытные варианты, далеко расположенные друг от друга, что бывает при числе более 10–12 изучаемых вариантов;

• большая громоздкость методов и нерациональное использование земельной площади (при дактиль-стандарте 40 % земельной площади уходит под стандарт, при ямб-стандарте – более 50 %). Чаще всего используется на первых ступенях селекционного процесса, когда из-за недостатка семян невозможно иметь требуемую площадь и повторность;

• возможное и часто совершенно непредвиденное искажение эффектов по вариантам, а также ненадежное искажение в статистической оценке ошибки опыта.

Достоинство стандартного метода – простота.

Систематические методы предусматривают неизменный порядок расположения вариантов в каждом повторении. Среди систематических методов размещения вариантов наиболее распространенными являются последовательный и шахматный методы.

Достоинство систематических методов размещения вариантов – их простота, а главный недостаток заключается в том, что система размещения вариантов может совпасть с закономерным варьированием плодородия почвы, что приведет к искажению результатов полевого опыта. Систематические методы размещения вариантов можно применять на опытных участках с равномерным плодородием по всей территории.

Случайное, или *рандомизированное,* размещение вариантов по делянкам полевого опыта основано на следующих положениях:

• способствует лучшему охвату каждым вариантом пестроты плодородия почвы опытного участка и как бы нарушает систематическое изменение плодородия внутри повторения и исключает его влияние на результаты опыта;

• рандомизация устраняет корреляцию между изучаемыми вариантами и ставит их в одинаковые условия для сравнения;

• все методы статистического анализа основаны на принципе случайного отбора.

Варианты в опытах можно размещать методами рандомизированных повторений, латинского квадрата, латинского прямоугольника, полной рандомизации, расщепленных делянок, смешивания и т. д. в зависимости от варьирования плодородия почвы, других условий выращивания, урожая растений, показателей их роста.

Рандомизированные повторения – случайное размещение всех вариантов опыта в пределах каждого повторения. При этом в каждом повторении каждый вариант встречается только один раз.

Итак, размещение вариантов методом рандомизированных повторений применяют:

1) когда не изучаемый фактор, например, плодородие почвы, варьирует в одном направлении или же по повторениям, а внутри он более выровнен;

2) при небольшом числе и размере опытных делянок.

Метод рандомизированных повторений представляет собой ортогональную схему. Это означает, что в каждом повторении имеется полный набор вариантов и каждый из них встречается в блоке (повторении) только один раз, благодаря чему данный метод приобретает наибольшую устойчивость и гибкость. Метод размещения вариантов должен быть по возможности прост, обеспечивать проведение опыта с минимальными ошибками независимо от вероятных случайностей (порча некоторых растений, их гибель от болезней и вредителей и т. д.), а также обеспечивать гибкость опыта, т. е. возможность введения новых вариантов вместо старых, уже не представляющих интереса.

1.2.10. Выбор модельного объекта

Многие экспериментаторы не уделяют должного внимания выбору модельного объекта, несмотря на то, что правильный выбор объекта наполовину предрешает успех работы. Представители сельскохозяйственных наук обычно используют реестровые сорта, а почвоведы, физиологи растений, специалисты по микроклимату и многие другие – семена «из мешка», совершенно не интересуясь их происхождением. В тех же случаях, когда исследователь задумывается над выбором объекта, решение принимается в пользу пристрастия и традиций коллектива, в котором он работает.

Главными критериями выбора объекта, на котором будет проводиться запланированное исследование, являются удобство для работы и воспроизводимость получаемых результатов.

Удобство модельного объекта. Если бы финансовые затруднения не заставили Т. Моргана отказаться от опытов на морских свинках (по некоторым данным – кроликов) и обратить внимание на дрозофилу, генетика, возможно, не стала бы лидером современной биологии. Дело в том, что последний объект давал возможность получить новое поколение в течение месяца и тем самым резко ускорить работу. И, напротив, именно использование неудобных для генетики плодовых культур И. Мичуриным и Л. Бербанком помешало этим великим ученым понять глобальное значение законов Г. Менделя.

Необходимо, чтобы выбранный нами модельный объект не затруднял, а облегчал решение поставленной задачи. В то же время полученные результаты должны экстраполироваться на возможно более широкий круг иных объектов и явлений. Поэтому избранная модель должна иметь как можно меньше специфических свойств, делающих ее несравнимой с другими интересующими нас растениями. С другой стороны, модели необходимы некоторые характеристики, облегчающие постановку эксперимента. Из этого следует, что не существует универсального модельного объекта на все случаи жизни. В каждой конкретной ситуации экспериментатор, взвешивая все за и против, находит оптимальный вариант. Поэтому все приведенные ниже соображения носят рекомендательный характер, а возможность их воплощения зависит от конкретной цели исследования.

Опыты в лаборатории, климокамере или теплице требуют такого растения, которое бы легко переносило специфическую экологию помещения. Летом в лаборатории проводилась серия опытов по устойчивости огурцов к охлаждению. Отдаленные эффекты охлаждения и закалки так и не удалось оценить по причине постоянного (в фазе 3–4 листьев) поражения растений паутинистым клещом. По условиям эксперимента обработка растений ядохимикатами была крайне нежелательна, и на старте работы в качестве модельного объекта следовало взять не огурцы, а более устойчивые томаты.

Такого типа опыты часто проводятся при недостаточной интенсивности света, поэтому в них следует использовать объекты, содержащие запасные фонды веществ, – прорастающие крупные семена, ростки картофеля. Для более поздних фаз онтогенеза прекрасным модельным растением являются бобы, отличающиеся весьма низким компенсационным пунктом фотосинтеза в отношении света. Неплохим объектом для зимней работы в неосвещенной теплице или в лабораторном помещении является хризантема, так как она достаточно выносliва к слабому освещению и может дать большое количество генетически идентичных растений благодаря легкому размножению черенками.

Возможность оперативно заложить новый эксперимент и проверить только что возникшие мысли требует быстрой подготовки объекта к ра-

боте. Здесь опять же можно рекомендовать проростки крупносемянных культур. Для быстрого проращивания свежеубранных покоящихся семян существуют специальные методы.

Для ускорения работы можно также рекомендовать использование в качестве модели арабидопсиса, который заслуженно носит титул растительной дрозофилы. Наличие большого числа разнообразных мутантных и инбредных линий, высокая семенная продуктивность, короткая вегетация (от 1–2 месяцев) и издание специального международного журнала (*Arabidopsis servis*) делают этот объект весьма привлекательным. К его недостаткам относятся малая масса растения и достаточно тонкая технология проращивания крайне мелких семян. Имеются также данные [9] о быстрорастущей капусте (*Brassica*), способной дать до 10 поколений в год, которая может быть моделью для исследований по генетике, защите растений, клеточной и молекулярной биологии. Для многих задач клеточной биологии очень удобна одноклеточная водоросль хломидомонада (*Chlomydomonas*), которая может легко культивироваться в лаборатории при питании как по автотрофному, так и по гетеротрофному типу. Это позволяет поддерживать мутанты с нарушенным фотосинтезом и получать уникальные результаты по биохимии и биофизике фотосинтеза. Наличие разнообразных мутантов и линий [7], а также компьютерной базы данных о штаммах [8] позволяет настоятельно рекомендовать этот модельный объект.

В большинстве опытов предпочтение должно отдаваться неполегающим и иммунным генотипам, а не аналогичным неустойчивым образцам, так как первые требуют меньшей затраты сил при уходе за ними. Равным образом следует предпочитать низкорослые растения высокорослым, если это не нарушает замыслов экспериментатора. Многие физиологические работы связаны с введением в растение тех или иных реагентов, метаболитов и т. д., что осуществляется опрыскиванием, инкубацией надземных частей в растворах или инфильтрацией их под давлением. В любом случае такая обработка не совсем надежна и может вызывать тяжелые побочные эффекты (особенно при контроле длительного последействия). По непонятной нам причине в экспериментах такого рода почти никогда не используются проростки риса, нормально развивающиеся под 2–7-сантиметровым слоем воды, который в любой момент можно заменить необходимым раст-вором. Аквариумные растения элодея и валлиснерия использовались еще в работах К. А. Тимирязева по изучению фотосинтеза, а сейчас на них проводятся работы по исследованию биофизики и биохимии фотохимических реакций. В специальных исследованиях фотосинтеза морских растений удобно использовать бурые водоросли, которые легко клонировать.

Воспроизводимость. При повторении эксперимента или его продолжении мы должны использовать тот же самый объект. Это, каза-

лось бы, азбучное требование на деле совсем непросто выполнить. Большинство сортов имеют сложную популяционную структуру, и частоты отдельных генотипов в них могут сильно изменяться по поколениям [1; 3]. При репродуцировании в различных регионах частоты генотипов в коммерческих сортах настолько изменяются, что спустя 8–10 лет под единой этикеткой оказываются совершенно различные образцы. Кроме того, качество семян сильно зависит от условий года и пункта репродукции. Даже элитные семена, выращенные в неподходящей зоне, не реализуют всех возможностей своего генотипа.

При конструировании засушника необходимо предусмотреть возможность его перемещения (по рельсам). Опытный участок должен укрываться с помощью засушника только на период дождя. После дождя засушник вновь передвигается на холостую стоянку. Передвижной засушник позволяет свести к минимуму влияние на растения «оранжерейного эффекта». При близком залегании грунтовых вод (1–1,5 м) возникает необходимость изоляции от них опытного участка. Без изоляции «эффект» засушника будет нулевой, так как корневая система проникает на глубину более 1 м, достигает грунтовых вод и эффективно их использует, что равносильно поливу.

1.2.11. Значение исходной гипотезы в выборе параметров для наблюдения

Любой опыт должен планироваться и выполняться в рамках каких-то теоретических концепций. Концепциями в науке называются идеи или обобщенные понятия, ориентирующие наши размышления и исследования в определенном направлении. К концепциям относятся:

• определения, т. е. полезные понятия, получаемые из экспериментов (клеточное строение биологических объектов, зональное распространение растительности по земному шару, пищевые цепи в экологии, гомеостаз и др.). В частности, одной из концепций является постулат о различной скорости биологических процессов на разных уровнях организации;

• классификации объектов по тому или иному признаку;

• понятия, придуманные для облегчения анализа и осмысливания результатов наблюдений (полулетальная доза, $K_{хоз}$ как доля ценной для нас части в общей биомассе, интенсивность фотосинтеза, транспирационный коэффициент).

В основе теории лежат законы, т. е. удобные соглашения, позволяющие привести в систему имеющиеся факты. Законом считается положение, которое имеет применение в наибольшем числе случаев и наилучшим образом соответствует теории, связывающей воедино огромное

многообразие наших знаний о природе. Большинство законов – это отражение явлений природы, которые мы рассматриваем, абстрагируясь от случайных факторов. Другой основой теории является набор аксиом – условий, которые не поддаются проверке и принимаются на веру в качестве отправного пункта наших рассуждений. Любая теория может быть справедливой только по отношению к лежащим в ее основе допущениям и аксиомам. При построении новой теории или проверке существующей создаются гипотезы (в качестве удобных предположений), которые, в отличие от аксиом, поддаются проверке. Основное назначение гипотезы – служить отправной точкой для экспериментальной проверки теории.

Для чего ставят опыты? Опыт как искусственная упрощенная модель какой-то реальной ситуации может преследовать две цели. Прежде всего, проверку тех или иных гипотез, их уточнение и совершенствование. Именно к этой категории относится большинство экспериментальных работ в академических лабораториях. Но наибольшее число экспериментов проводится в плане разработки каких-либо технологий, будь то испытание новых машин, лекарств или схем агротехники. При всей практической направленности эти опыты также представляют собой проверку теоретических предпосылок и уточнение наших знаний в данной области. Любой опыт на растении является вопросом, заданным нами объекту, на который мы желаем получить ответ. И этот вопрос должен быть поставлен с учетом всех наших знаний по данной проблеме.

Таким образом, цель эксперимента – проверка какой-либо гипотезы с целью уточнения или опровержения теории. Замысел и планирование эксперимента должны быть полностью подчинены этой цели. Полученные в опыте результаты должны указать дальнейшее направление исследования, и потому корректно полученный результат не может допускать двусмысленного толкования. Но каждый факт нуждается в комментариях (критическом анализе степени точности, пределов применимости, воспроизводимости результатов, в новых гипотезах). По мере накопления фактов мы начинаем все больше зависеть от теории, в рамках которой рассматриваются результаты эксперимента. Из этого следует, что любой опыт должен планироваться и осуществляться только в рамках определенных гипотез, истинность которых он проверяет.

1.2.12. Выбор параметров для наблюдения в зависимости от уровня организации изучаемого объекта

Известно о наличии у растений неспецифичной реакции на самые разнообразные экологические факторы. Но в любом случае мы можем

обнаружить в пределах нормы реакции и специфические для данной группы воздействий изменения. Они и являются объектом наблюдения. Исследователь, выбирая для наблюдения тот или иной физиологический показатель, исходит из поставленной задачи. Параметр, по изменению которого предполагается контролировать состояние целого растения или отдельных физиологических систем, должен отвечать ряду условий.

Во-первых, он должен иметь как можно меньшее генетическое варьирование внутри изучаемой популяции или сорта. В ряде случаев это условие достигается использованием чистых линий.

Во-вторых, при исследовании специфической реакции желателен выбор показателя, который мало зависит от колебания тех фоновых экологических условий, которые плохо поддаются стандартизации. В противном случае будет иметь место широкое варьирование по повторностям, и статистическая достоверность опыта снизится.

В-третих, важным условием является удобство измерения наблюдаемого параметра и однозначное истолкование полученных результатов.

Всегда следует помнить, что с увеличением технической сложности метода или прибора возрастает и число возможных ошибок от некорректной подготовки образца, неправильной калибровки прибора, нарушения регулировки или в связи с недостаточным техническим уходом за установкой. Точность современного научного оборудования весьма притягательна, как и быстрота выполнения анализов. Возможности исследователя при этом возрастают во много раз, но он не должен забывать, что самый совершенный прибор не исправит артефакта, возникшего от неправильного выращивания растений, служащих объектом опыта, или несоответствия запланированного и фактического режимов воздействия на объект. Поэтому следует принять за правило никогда не пользоваться приборами и аналитическими методами, более сложными, чем это необходимо для достижения замысла исследователя.

Остановимся на вопросе о выборе параметров наблюдения в зависимости от изучаемого уровня организации. Уже отмечалась необходимость учета скорости протекания процессов на исследуемом уровне. В самом общем виде можно сказать, что чем выше уровень организации живой системы, являющейся объектом исследования, чем больше пестрота условий, тем более интегральными должны быть методы наблюдения и регистрируемые параметры.

В лабораторном опыте при работе на клеточном или тканевом уровне организации для исследования водного режима широко применяется определение связанности воды, диэлектрической проницаемости и коэффициента самодиффузии. При исследовании на уровне организма

(вегетационный опыт) с этой целью используют показатели интенсивности транспирации и водного дефицита органов растения. А в случае изучения посева или естественного фитоценоза основными показателями водного режима становятся гидрометеорологические наблюдения, определение баланса поступления и испарения воды, а также исследование водного потенциала в системе «почва – растение». Безусловно, определение основных параметров водообмена в ценозе не исключает дополнительного исследования в нем транспирации у доминантов сообщества. Такое наблюдение может дать ценную, но только дополнительную, информацию. Определение же в полевом опыте биопотенциалов растения не дает иной информации, кроме как о факте освоения автором сложной методики.

Уже на этапе планирования эксперимента необходимо составить четкое представление о том, какие уровни организации играют основную роль в интересующем нас явлении, и в соответствии с этим выбрать наблюдаемые параметры и методы их регистрации.

Важно помнить о непригодности переходного периода между стационарными состояниями для регистрации наблюдений. Если накануне эксперимента с растениями, выращенными в факторостатных условиях, из-за неисправности регулирующих механизмов произойдет резкое повышение или понижение температуры, исследователь должен отложить опыт на несколько дней для восстановления равномерного течения физиологических процессов. В таких случаях не надо успокаивать себя тем, что скачок условий был кратковременным, или ссылаться на соблюдение равенства условий в опыте, – все варианты подверглись незапланированному воздействию. Варианты опыта потому так и называются, что они разные, следовательно, они будут по-разному реагировать и на дополнительный фактор.

Часто в опытах, связанных с изучением устойчивости растений, отрицательное действие того или иного фактора принимают априорно, при этом забывая, что один и тот же физический уровень фактора (температуры, освещения, водообеспечения) может восприниматься устойчивым генотипом как раздражение, а неустойчивым – как значительное повреждение. Поскольку норма реакции генотипа и уровень его адаптированности связаны не с физической, а с физиологической нагрузкой неблагоприятного воздействия, то для его оценки может оказаться полезным сравнение вариантов по изменению роста в последовательном ряду фитомеров.

В нормальных условиях на побеге злака длина каждой листовой пластинки, влагалища или междоузлия стебля примерно равна среднему между длиной выше- и нижележащего органа. На побеге двудольных и ветвях голосемянных междоузлия в средней части годичного приро-

ста фитомеры бывают примерно одинаковых размеров. Если, измеряя длину этих органов, мы находим отступления от данной закономерности, то правомерно предположить изменение условий в момент роста этих структур. Но о конкретной природе факторов, определивших усиление или подавление роста, мы не можем судить на основе только этой информации.

Когда ботаники делают вывод о засушливом периоде столетней давности на основании промеров толщины годичных колец на стволах деревьев, они преувеличивают возможности данного метода. С таким же успехом эффект уменьшения толщины годичных колец мог быть результатом похолодания климата или стойкого уменьшения прозрачности атмосферы в результате катастрофического события (извержения вулканов, падения большого метеорита и др.).

1.2.13. Обработка результатов

Запись результатов. Все результаты замеров и визуальные наблюдения должны немедленно записываться. Не следует полагаться на свою память и откладывать записи «на потом». Запись должна производиться без какой-либо обработки. Если опыт длится более 1–2 дней, обсчет результатов следует производить, не дожидаясь конца опыта, так как вычисления лучше делать по свежей памяти. При обработке результатов могут обнаружиться расхождения, которые приведут к необходимости внести изменения в опыт.

Не стоит производить вычисления (даже самые простые) в уме до записи измерений. Например, если для получения истинного отсчета на приборе показания на его шкале надо разделить на два, следует записать показания шкалы прибора, а в соседней колонке – результат деления. Необходимо помнить, что если при вычислении в уме, до записывания результата, вы допустите ошибку, то позднее ее уже не исправить. Следует также избегать переписывания. При перенесении первоначальной записи с черновика в «чистовую тетрадь» не только теряется время, но и возможны ошибки. Последние выявить очень трудно, а при уничтожении черновика – невозможно. Не нужно исправлять ошибочно написанные цифры, чтобы потом не ломать голову над их расшифровкой. Лучше зачеркнуть неверную цифру и рядом написать правильную.

В большинстве работ используются не все результаты наблюдений. Часто мы приходим к выводу, что некоторые из них либо не очень показательны, либо не имеют отношения к делу. Иными словами, мы отбираем результаты. Это абсолютно правильно, если при отборе руководствоваться объективными критериями. Но первичные данные наблюдений надо обязательно сохранять, так как в дальнейшем они могут пригодиться.

В записях важна не красота, а ясность. Этому способствует подробное описание условий постановки опыта, календарных сроков его проведения, схемы, которые должны быть по возможности проще и на которых следует указывать только то, что имеет отношение к эксперименту. Описание условий опыта должно быть настолько подробным, чтобы любой квалифицированный экспериментатор мог его повторить. Для сохранности результатов все данные, набранные на компьютере, полезно переписать на внешний носитель.

Заголовки таблиц должны быть достаточно подробными, иначе через несколько лет «слепая» таблица будет для вас немой. В каждой колонке надо указать наименование или символ и единицы измерения. В первичной записи группы данных необходимо разделить большими пробелами и каждой группе дать заголовок. Сводные результаты (например, средние по серии измерений) необходимо не только обозначить, но и подчеркнуть или как-то выделить. При ведении записи не нужно экономить бумагу. В верхней части страницы следует оставить достаточно места для заглавия. После проведения нескольких наблюдений вы сможете уточнить заглавие или добавить к нему комментарий.

Вычисления. Все вычисления следует производить разборчиво и аккуратно, так как неразборчивые записи являются источником арифметических ошибок. Вычисления, особенно результаты сложных единичных обсчетов, необходимо проверять. Важно получить конечный результат различными способами вычисления. Чем сильнее ход и способ вычисления проверки отличается от первоначального расчета, тем лучше. Если при проверке получен иной результат, то прежде всего нужно проверить верность первоначального расчета.

Все результаты одной серии наблюдений должны вычисляться с одинаковой точностью. Калькулятор способен выдать большое число знаков после запятой, но не имеет смысл вносить в таблицу число десятичных знаков, превышающее точность инструмента или прибора. Так, при измерении длины листьев линейкой (точность измерения 1 мм) не имеет смысла записывать среднюю величину с долями миллиметра.

Лукавые цифры. Значительная часть вычислений при обработке опытов имеет целью сделать результат наглядным, более доступным для осмысливания. На этом пути кроется немало подводных камней. Есть поговорка о том, что математика подобна жерновам – она перемелет все, что в нее подадет, но результат будет зависеть от качества вложенного.

Графическое изображение. Хорошей иллюстрацией будет такая, на которой результаты выражены полно и ясно, что нельзя передать словами на той же площади листа. Соотношение между текстом

и иллюстрациями следует выбирать так, чтобы передать наибольшее количество точной информации с наименьшей потерей времени и места. Часть информации можно представить в виде таблиц. Состав питательных растворов, некоторые метеорологические данные и многое другое вообще нельзя представить в иной форме, кроме таблиц. В виде таблиц представляются и те результаты, которые читатель, возможно, пожелает подвергнуть проверке или пересчету. И, конечно, не следует приводить одни и те же данные и в форме таблиц, и на рисунках.

Поскольку современная компьютерная техника дает большие возможности графического изображения цифровых данных, экспериментатору необходимо освоить работу в соответствующих программах. Любая научная работа завершается оформлением научного отчета или подготовкой публикации. При их написании не стоит тонуть в частностях, важно выйти за пределы полученных результатов и увидеть их место в общей картине. Так, классики экспериментальной биологии (Ч. Дарвин, Ю. Либих, К. Тимирязев, В. Докучаев) не просто излагали результаты экспериментов, а развивали свои мысли на основе фактических данных. Они писали комментарии к точке зрения противников, излагали свои взгляды на картину мира вообще и в области их научных интересов в частности, кроме того, они владели хорошим литературным языком.

Список литературы

1. *Агаев, М. Г.* Популяционная изменчивость культурных растений и ее селекционное значение / М. Г. Агаев // Генофонд сельскохозяйственных растений и его использование в современной селекции: труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. – Л.: ВИР, 1987. – Т. 100. – С. 248–260.

2. *Доспехов, Б. А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

3. *Коваль, С. Ф.* Каталог изогенных растений яровой мягкой пшеницы Новосибирская 67 и принципы их использования в эксперименте / С. Ф. Коваль // Генетика. – 1997. – Т. 33, № 8. – С. 1168–1173.

4. *Коваль, С. Ф.* Растение в опыте / С. Ф. Коваль, В. П. Шаманин. – Омск, 1999. – 201 с.

5. *Моисейченко, В. Ф.* Основы научных исследований в плодоводстве, овощеводстве и виноградарстве / В. Ф. Моисейченко, А. Х. Заверюха, М. Ф. Трифонова. – М.: Колос, 1994. – 383 с.

6. *Монтгомери, Д. К.* Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. / Д. К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.

7. Петергофская генетическая коллекция штаммов зеленых водорослей Chlorella, Scenedesmus, Chlamydomonas / К. В. Квитко [и др.] // Культивирование коллекционных штаммов водорослей. – Л., 1983. – С. 28–56.

8. *Чунаев, А. С.* Графический интерфейс базы данных о штаммах петергофской генетической коллекции микроводорослей / А. С. Чунаев // Генетические коллекции растений. – Новосибирск: ИЦиГ СО РАН, 1993. – Вып.1. – С. 159–179.

9. *Williams, P. H.* Rapid cycling populations of Brassica / P. H. Williams, C. B. Hill // Science. – 1986. – Vol. 232. – P. 1385–1389.

1.3. Закладка и проведение полевого опыта

1.3.1. Выбор участка для полевых опытов

В процессе выбора участка проводят почвенно-биологическое обследование, изучают историю поля, его растительный покров, рельеф и микрорельеф. Подбирают почву и подпочву с учетом уровня грунтовых вод, при необходимости проводят рекогносцировочный и уравнительный посевы. Определенные требования предъявляются при закладке опытов в существующих насаждениях.

Почвенно-биологическое обследование участка. При выборе участка исходят не только из программы исследований, но и из всего комплекса важнейших природных условий и биологических требований самих растений. Рельеф, крутизна склонов, их экспозиция, почва, подпочва, уровень грунтовых вод в опыте должны быть идентичны тем, при которых выращивается большая часть садов, ягодников или овощей в конкретной зоне или районе.

Участки подбирают с перспективой длительного использования: для плодовых культур и винограда – на несколько десятков лет, для ягодников – 10–15 лет, овощных культур – на срок полной ротации севооборота. Перед их выбором исследователь составляет план научной работы по конкретной теме. В нем указываются схема опыта, ориентировочное число повторностей, размеры опытных делянок, их длина и ширина, защитки. Зная число вариантов (l), число повторностей (n), учетную площадь опытной делянки и площади всех защиток, рассчитывается площадь, которую надо взять для опытного участка. При почвенно-биологическом обследовании участков придерживаются основного правила – типичность участка, т. е. его репрезентативность. Обследование проводится в два этапа.

На первом этапе – *этапе экспертного обследования* – комиссия выделяет один или нескольких участков для более детального обследования. При этом изучают и почвенно-грунтовые профили, для чего на границах участка, выбранного под опыт (но не на самом участке), делают два-три разреза глубиной до 2–2,5 м и описывают их по следующей схеме: тип почвы; механический состав; глубина вскипания; мощность гумусового горизонта и содержание гумуса; содержание подвижных форм

азота, фосфора и калия; поглотительные свойства и кислотность почвы; водно-физические свойства.

Задача почвенного обследования – дать почвенную характеристику опытного участка в целом и помочь наилучшим образом расположить опыт (в пределах одной почвенной разности).

После обследований комиссия составляет письменное заключение о выделении участка под конкретный опыт.

На втором этапе – *этапе детального обследования* – на выделенном под опыт участке всесторонне характеризуют почву, подпочву, уровень грунтовых вод. Далее составляют почвенную карту в масштабе 1:5000 или 1:1000, для чего по диагонали участка делают два-четыре почвенных разреза на глубину 2–2,5 м (! только в местах будущих дорог, защиток и разворотных полос, но не на местах будущих делянок во избежание их порчи). При необходимости между разрезами делают еще и прикопки. Из почвенных разрезов и прикопок отбирают образцы почвы, анализируют их и определяют, насколько типична почва.

Изучение истории участка. Методика не рекомендует проводить закладку опытов на участках, история которых не известна. Поэтому первое, что необходимо сделать при выборе участка, – установить совершенно точно его однородность не менее чем за последние три-четыре года. При обследовании участка детально описывают историю данного поля, сада или ягодника, устанавливают, где и какие культуры раньше сеяли. В год, предшествующий выбору участка для опыта, на всей площади следует высевать одну культуру. По книге истории полей устанавливают, где и какие вносили удобрения, в каких дозах, при этом особенно важно установить количество внесенных органических удобрений. Дозы удобрений, их формы и глубина внесения в предшествующие годы должны быть одинаковыми по всему обследуемому участку. Одинаковыми должны быть также сроки, способы и в особенности глубина обработки почвы.

На плодородие почвы сильно влияют бывшие стоянки скота и дороги длительного пользования, поэтому они должны быть исключены из территории будущего опыта.

При изучении истории поля обращают внимание на его окультуренность: глубину окультуренного слоя, его плодородие, pH почвенного раствора, наличие в почве семян сорняков, степень засоренности посевов. Посевы, сильно засоренные сорняками, особенно злостными – корневищными, корнеотпрысковыми, сорняками-паразитами и др., необходимо предварительно очистить от сорной растительности, а лучше такие участки из опытов исключить, так как их почва содержит большие запасы семян, корневищ и корневых отпрысков сорняков, уничтожить которые в короткие сроки невозможно. Число семян и вегетативных ор-

ганов размножения сорняков в почве определяют одновременно с почвенными исследованиями.

Изучение растительного покрова. Наличие на участке одиночных плодовых деревьев с хорошо развитым штамбом и кроной говорит о благоприятных для роста плодовых культур условиях. При отсутствии таких деревьев обращают внимание на растения-индикаторы. Так, хороший рост дуба, липы, лещины, клена и ясеня свидетельствует о хороших почвенных условиях для плодовых пород. Произрастание сосны, белоуса и лишайников указывает на сильную обедненность почв питательными веществами. Об избыточном увлажнении участка говорит наличие на нем осоки, щучки, осины, ивы и ольхи. Индикатором кислых почв являются хвощ полевой, щавель.

С намеченным для опыта участком знакомятся в первую очередь по материалам прежних почвенных исследований и агрохозяйственной карте, затем приступают к изучению рельефа и почвы.

Изучение рельефа и микрорельефа. Форма рельефа должна обеспечивать защиту опытного участка от действия сильных ветров и суховеев, направление которых учитывают также при создании ветроломных линий и защитных полос.

Весь опыт размещают на склоне одной и той же крутизны и экспозиции. Это требование очень важно, поскольку даже на весьма пологих склонах (1–2 °) разница между прямой солнечной радиацией, поступающей на южные и северные склоны в весенний период, составляет 30 %, в осенний – 40 %. Южные склоны в период вегетации на 10–30 % теплее, чем ровные места. За период вегетации сумма температур на пологих южных склонах на 120 °С, а на крутых на 300 °С превышает те, которые отмечаются на ровных местах. При этом продолжительность безморозного периода на склонах увеличивается на 30 дней и больше.

При наличии даже небольших склонов на участке необходимо предусмотреть противоэрозионные мероприятия, чтобы сохранить верхний плодородный слой почвы. Эти меры особенно важны в опытах с удобрениями, так как удобрения могут переноситься вдоль склона с одних делянок на другие атмосферными осадками, талыми и поливными водами.

На результаты опыта может влиять и микрорельеф, поэтому бугорки, западины на участке необходимо выровнять, тщательно спланировать, сделать нивелировку, а результаты съемки нанести на почвенную карту.

Выбор почвы и подпочвы. Почва и почвообразующая порода должны обеспечить глубокое проникновение корней и удовлетворять следующим требованиям: быть достаточно рыхлыми, влагоемкими, водо- и воздухопроницаемыми, не иметь подтока холодных грунтовых

вод. Хорошо подходят для опытов лессовые и делювиальные суглинки, лессовидные супеси и др. Непригодны или малопригодны плотные почвообразующие породы с плохой водо- и воздухопроницаемостью: суглинистая или суглинисто-супесчаная морена в первичном залегании, покровные глины, твердокаменные породы и др.

Обследовать необходимо не только намеченный участок, но и всю прилегающую местность, чтобы оценить микроклимат всей окружающей опыт территории. Выбор участка зависит от почвенно-климатической зоны.

Почвы для плодовых и ягодных культур. В зоне дерново-подзолистых почв лучший рельеф – средневозвышенное плато. Склоны – юго-западные, западные, северо-западные и южные. Почвы – дерновые, дерновые слабо- и среднеподзолистые, легкосуглинистые и супесчаные.

При выборе участка под опыты с плодовыми растениями обязательно определение уровня грунтовых вод. На участках с семечковыми культурами грунтовые воды должны находиться не ближе 2,5 м от поверхности почвы, с косточковыми – 2 м, на ягодниках – не ближе 1,5 м.

Почвы для виноградников должны характеризоваться типичным рельефом. Почву, подпочву выбирают в зависимости от зоны виноградарства и выращиваемого сорта. Уровень грунтовых вод во всех случаях должен быть не менее 2,5–3,0 м от поверхности почвы.

Почвы для овощных культур. Подбирают участки с ровным рельефом, хорошо окультуренными и плодородными почвами, наиболее распространенными в конкретной почвенно-климатической зоне под овощными культурами.

Весьма благоприятны для овощеводства почвы речных пойм, однако если в хозяйстве овощи выращивают на землях полевого севооборота, то опыты планируют именно на таких почвах.

При распространении торфяных окультуренных почв опыты закладывают на торфяных почвах. Менее пригодны торфяно-болотные почвы, малопригодны песчаные, а также смытые тяжелые глинистые почвы, в которые предварительно не были внесены повышенные дозы органических удобрений. Уровень грунтовых вод должен быть не менее 1,0–1,5 м.

Выбор участка. Участок следует выбирать не ближе 150 м от леса и 25 м от одиночных деревьев. Расстояние от лесополосы должно быть не менее полутора-двукратной ее высоты.

На расстоянии менее 10–20 м не должно быть плотных изгородей, так как они нарушают воздухообмен и затеняют опытные растения, а также грунтовых дорог, пыль от которых может оседать на растениях. Расстояние до строений должно быть не менее 50 м. При необходимости орошения участок выбирают вблизи от источников воды.

Желательно, чтобы участок располагался вдали от магистральных дорог, поскольку это помогает избежать влияния выхлопных газов, а также порчи, хищения, случайного поедания домашними животными опытных растений.

1.3.2. Рекогносцировочный и уравнительный посевы

Как бы тщательно ни подбирался участок для опыта, выявить его плодородие на каждом квадратном метре с помощью химических анализов почвы невозможно. Если опыт закладывается на поле, то перед его закладкой на выбранном участке проводят рекогносцировочный посев.

Рекогносцировочный (разведывательный) посев – посев одной культуры семенами одного сорта, класса, репродукции и при одинаковой агротехнике. Цель посева – выявить варьирование плодородия почвы путем учета урожая высеянной культуры на каждой маленькой делянке всего участка.

Для рекогносцировочного посева важны выбор культуры, качество агротехнических работ, подготовка к уборке и уборка урожая, составление плана. По результатам посева планируют опыт.

Выбор культуры. Чаще всего используют яровые зерновые культуры, так как на урожай озимых может влиять не только плодородие почвы, но и вымерзание, выпревание, выпирание и даже повреждение посевов грызунами. Обычно высевают ячмень, овес, вико-овсяную смесь, т. е. культуры сплошного сева. Пропашные культуры менее желательны, так как их урожай зависит не только от почвенных условий, но и от междурядной обработки почвы, при которой лапы культиватора иногда смещаются от центра междурядья и подрезают культуру, ухудшая ее рост. На всей площади до посева должны быть одинаковыми предшественник и агрофон.

С уборкой не запаздывают, так как это может усилить влияние на урожай погоды, вредителей, болезней, сорняков и других факторов. Поэтому лучше выращивать яровые не на зерно, а на зеленую массу, при этом раньше освобождается поле и можно своевременно внести удобрения и более доброкачественно обработать почву под опытную культуру.

Агротехнические работы. На выделенной для рекогносцировочного посева площади все агротехнические работы проводят одновременно и на одинаково высоком уровне. Одинаковыми и единовременными должны быть глубина и срок проведения вспашки, предпосевная, послепосевная и послевсходовая обработка почвы, борьба с вредителями, болезнями и сорняками. При этих условиях легче вычленить влияние плодородия почвы на рост и урожай рекогносцировочного посева.

Подготовка к уборке. Перед уборкой урожая посев делят на делянки площадью не более площади опытных делянок. Форма делянок должна быть удлиненной, с направлением вдоль наибольшего варьирования плодородия почвы. Лучшее отношение ширины к длине 1:10 или 1:15, желательно также, чтобы ширина была равна ширине захвата уборочного агрегата. Границы делянок фиксируют вешками и шнурами.

Уборка урожая. Лучше проводить уборку урожая малогабаритными косилками, а при отсутствии косилок – убирать вручную.

Так как влажность зеленой массы в течение дня значительно меняется, через каждые 1,5–2 ч отбираются пробные снопы, их взвешивают, крепят этикетки с указанием номера снопа, времени отбора и массы. После высушивания под навесом до постоянной массы снопы снова взвешивают и рассчитывают процент влаги. С помощью полученных данных зеленую массу, собранную со всех делянок, приводят к единой влажности. Учитывают урожай с каждой делянки, взвешивая скошенную массу, которую убирают в сжатые сроки – за один-два дня. Результаты учета урожая используют для составления плана рекогносцировочного посева.

Составление плана рекогносцировочного посева. Одновременно с выделением делянок составляется план посева в соответствующем масштабе. В зависимости от урожая делянки закрашиваются разными цветами: красным – с самым высоким урожаем, зеленым – со средним, синим – с низким, делянки с самым низким урожаем оставляют неокрашенными. Таким образом, выделяются блоки с разным уровнем плодородия, на которых разместятся повторения будущего опыта. Блоки с низким уровнем плодородия в опыт не берутся.

Использование плана рекогносцировочного посева. Данные урожая каждой делянки выписываются в возрастающем порядке (ранжируются). Далее строится вариационный ряд. Обработав его методами математической статистики, вычисляется коэффициент вариации V. Значение коэффициента вариации и относительной ошибки опыта ($S_{x\%}$) используют для расчета повторности (n) будущего опыта по формуле $n = (V/S_{x\%})^2$.

По значению относительной ошибки планируется точность опыта. Для хорошей точности выбирается значение $S_{x\%}$ не более 5 %. Если коэффициент вариации плодородия почвы, вычисленный по данным рекогносцировочного посева, составляет 9 %, то повторность опыта будет равна $(9/5)^2 = 3{,}24 = 4$. Округление всегда происходит в большую сторону.

Делянки рекогносцировочного посева с одинаковым плодородием группируют в блоки, которые будут служить повторениями. Если расчетное число повторений, как в приведенном примере, равно четырем,

то и блоков должно быть четыре. Кроме того, рекогносцировочный посев позволяет выявить направление основного варьирования плодородия почвы и правильно (длинной стороной вдоль изменения плодородия почвы) расположить опытные делянки.

На рекогносцировочный посев затрачивается много труда, техники и времени (1–2 года), поэтому его используют не всегда. Обеспечения выравненности почвы по плодородию можно достичь уравнительным посевом.

Уравнительный посев аналогичен рекогносцировочному, но проводится без дробного учета урожая. Его цель – выравнивание плодородия почвы и визуальная (глазомерная) оценка изменения плодородия по состоянию самого посева. От производственного посева уравнительный посев отличается более высоким уровнем и единообразием агротехники по всему участку, а также сжатыми сроками всех агротехнических работ.

Чем больше пестрота плодородия почвы, тем большее число лет следует применять при уравнительном посеве. Влияние на плодородие почвы разноглубинной вспашки, контрастных доз удобрений, известкования нельзя выровнять посевом, особенно если действие перечисленных агроприемов было длительным. Не устраняются и значительные естественные различия почв и подпочв.

Кроме выравнивания плодородия почвы, в задачи уравнительного посева входят: выявление пространственного изменения самого плодородия, выделение блоков с минимальным изменением, т. е. выделение повторений планируемого опыта, и определение ориентации делянок.

Исследователь с большим опытом работы на основе визуальных оценок уравнительного посева может спланировать опыт по всем правилам методики опытного дела в условиях не только научного учреждения, но и производства, где рекогносцировочные посевы как дорогостоящие и длительные редко применяют.

1.3.3. Методика разбивки участка

Изучив и подготовив соответствующим образом земельный участок, наносят намеченное расположение опыта на схематический план, где указывают точные размеры всего опыта, повторений, делянок и т. д. Затем по плану размещают опыт в натуре, т. е. выделяют и фиксируют границы опыта, отдельных повторений и делянок. При этом нужно помнить следующее: чтобы площадь повторений и делянок точно соответствовала принятым размерам, все делянки во всех повторениях обязательно должны быть одинаковой ширины и длины, а форма – прямоугольной.

Перед выходом в поле необходимо иметь требуемый инструмент для разбивки опыта: теодолит или экер для построения прямых углов, стальную мерную линейку или рулетку, крепкий длинный шнур, вешки длиной 1,5–2 м (5–10 шт.), угловые столбики (репера) для фиксирования границ опыта или отдельных повторений, рабочие колышки длиной 25–30 см для фиксирования границ делянок, этикетки.

Разбивка начинается с выделения общего контура опыта и контуров отдельных повторений. Опыт или каждое повторение (при их разбросном размещении) со всех сторон окаймляется защитной полосой шириной не менее 5 м.

При выделении контура вначале прокладывают прямую линию по вешкам или шнуру, а затем восстанавливают перпендикуляры к этой линии. Прямые углы можно построить не только с помощью теодолита или экера, но и с помощью шнура и рулетки, используя теорему Пифагора, согласно которой в прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов, или свойство медианы равнобедренного треугольника.

Затем выделяются повторения и делянки. Эта работа технически не очень сложная, но требует аккуратности. Колышки на границах делянок нужно вбивать точно возле меток с одной стороны мерной ленты.

В зависимости от опыта кроме общей защитной полосы нужно предусматривать защитки, чтобы устранить влияние соседних вариантов. Обычно они составляют 2–3 м. Границы защиток вокруг делянок чаще всего закрепляют после появления всходов.

В опытах по сортоиспытанию защиток не предусматривают, так как допускают, что практически влияние сортов одной и той же культуры друг на друга незначительно и вряд ли может быть уловлено полевым опытом. Но сильно развивающиеся сорта могут оказать влияние, и довольно таки существенное, на более слабые сорта.

После разбивки опыта фиксируют основные границы опыта, от которых можно в любое время установить границы повторений и делянок с помощью реперов.

1.3.4. Правила выполнения полевых работ, учетов и наблюдений

Важнейшие правила при проведении полевых работ – единовременность, равнокачественность, краткосрочность, тщательность и высококачественность.

Все сельскохозяйственные работы должны проводиться в течение одного дня, а если это невозможно, то в пределах повторений, так как незначительный разрыв ведет к существенным различиям в росте и

развитии растений. Неоднократное нарушение принципа единственного различия в течение вегетации часто ведет к полной утрате достоверности опытов.

Агротехнический фон на опытном участке должен быть оптимальным для проявления эффекта от изучаемого приема или сорта и, как правило, более высоким, чем в производственных условиях. Здесь могут быть использованы любые прогрессивные агротехнические приемы, не мешающие выявлению действия того или иного фактора.Основным требованием к любому способу применения удобрений (в качестве объекта исследований или агротехнического фона) является их равномерное распределение по площади делянок. Органические удобрения обязательно вносятся поделяночно, даже если выступают как фон. Они должны быть однородными по составу, происхождению, степени разложения, влажности.

При внесении удобрений делянка должна быть разбита на квадраты. Дозу удобрений раскладывают равными частями на углах квадратов, а затем вилами и граблями равномерно распределяют по поверхности делянки и запахивают. Органические удобрения недопустимо оставлять на делянке в кучах более чем на один день.

Техника рассева минеральных удобрений должна обеспечивать их равномерное распределение по делянкам. Перед применением удобрения нужно тщательно измельчить и просеять. Вносить их лучше туковой сеялкой. При ручном внесении удобрения рассевают в два приема или с таким расчетом, чтобы немного удобрений осталось. Остаток всегда можно разбросать равномерно по всей делянке, а при нехватке удобрений на какую-то ее часть делянка считается испорченной.

Если основная обработка почвы не является изучаемым фактором, она должна быть однородной, одновременной и высококачественной. Вспашку и другие обработки нужно проводить перпендикулярно к длинным сторонам делянок, чтобы возможные случайные факторы одинаково влияли на все варианты опыта. Недопустимы развальные и свальные борозды, разворот орудий должен осуществляться за пределами делянок – на защитных полосах или полевых дорогах.

Пристальное внимание должно быть уделено технике высева или посадке и качеству посевного материала. Во всех опытах норму высева желательно устанавливать по числу всхожих семян, а не по массе. Посев, как правило, должен быть проведен в один день на опытном участке. В опытах, допускающих сплошной посев, обязательно проведение посева поперек всех делянок опыта или всех делянок целых повторений. Первый проход делается по шнуру или борозде. Высевающие аппараты необходимо включать за 1–1,5 м до начала делянки и выключать только за границами поля, следует тщательно следить за работой сошников, количеством семян в ящике и равномерностью их размещения в нем.

При посадке пропашных культур необходимо следить за тем, чтобы на делянку приходилось строго определенное число рядков (борозд) культуры.

Уход за растениями на опытном поле не отличается от уходов за соответствующими культурами в производственных условиях. Все работы нужно выполнять своевременно, тщательно и однообразно. Особое внимание должно уделяться борьбе с сорняками, так как они очень сильно нарушают сравнимость вариантов.

К специальным работам относятся поделка и прочистка дорожек, обрезка по шнуру концов полей, делянок, отбивка защитных полос, своевременная расстановка этикеток и т. д.

На всей территории опыта должна поддерживаться чистота.

Полевой опыт включает наблюдения за растениями и условиями внешней среды. В зависимости от задач опыта могут преобладать наблюдения или за растениями, или за факторами и условиями их роста и развития. Сопутствующие наблюдения дают ценные сведения о различных сторонах изучаемого явления (о сроках наступления фенофаз, биохимическом составе, продуктивности фотосинтеза в различных вариантах опыта, зараженности болезнями и т. д.).

Полевой опыт должен сопровождаться не набором так называемых типичных наблюдений (рост, влажность почвы, густота посева и т. д.), а теми наблюдениями, без которых нельзя понять изучаемое явление, уяснить внутренний ход процесса и объяснить получение тех или иных прибавок урожая или характер изменения его качества. Таким образом, первое требование к наблюдению – целенаправленность.

Второе требование – это типичность и точность. Для соблюдения типичности наблюдения нужно проводить в реальных, типичных условиях опыта, а не на защитных полосах. Что касается точности наблюдения, то она должна быть достаточной для доказательства существенности предполагаемых различий между вариантами опыта.

Для проведения наблюдений очень важно правильно определить достаточный объем выборки (пробы) для различных измерений, подсчетов и анализа и правильно отобрать объекты в выборку. Выборка обязательно должна быть репрезентативной, т. е. свободной от тенденциозности и субъективизма. Это означает, что всем объектам совокупности предоставляется равная вероятность попасть в выборку. Объем выборки должен быть таким, чтобы он соответствовал совокупности изучаемых объектов и заданной точности опыта. Обязательно необходимо предусматривать статистическую обработку сопутствующих наблюдений.

Фенологические наблюдения – это регистрация фаз развития культурных растений. Под фазами понимают появление внешних морфологических признаков. Обычно отмечают начало фазы, когда

5–10 % растений делянки вступило в нее, и полную фазу, когда наблюдается 50–75 % растений. Наблюдение ведется глазомерно (важно выдерживать одинаковый подход) и проводится одним человеком. Фенологические данные и сроки, в течение которых протекают различные фазы вегетации, представляют существенную часть сведений, необходимых для определения основных факторов, действующих на урожай. Особенно широко они используются для вычисления продолжительности межфазных периодов и общей длины вегетационного цикла.

1.3.5. Годовой отчет о научных исследованиях и дипломная работа

Отчет о научных исследованиях составляют в конце работы на 10–15 страниц текста. В нем должны содержаться основные результаты исследований за год. Составные части отчета: титульный лист, список исполнителей, реферат – 0,5 стр.; введение, краткое изложение состояния вопроса, научное обоснование исследований – 1 стр.; условия проведения исследований – 0,5 стр.; методика – 0,5 стр.; результаты исследований и их анализ – 8–12 стр.; выводы и предложения – 1 стр.; список литературы, приложения.

Текст отчета должен быть четким, логичным, а выдвигаемые предположения – доказываться как собственными, так и литературными данными. Особое внимание следует обращать на противоречия, которые необходимо подвергать критической оценке.

В отчете также даются таблицы, графики, рисунки, фотографии, схемы. Обязательно указываются использованные методики и их авторы. Описание оборудования и аппаратуры не приводится. Условные обозначения и сокращения должны соответствовать стандартам, термины и определения – быть однозначными.

По отчету автор делает доклад на собрании кафедры, лаборатории, отдела. После обсуждения присутствующие дают рекомендации по улучшению работы. Основное содержание отчета желательно опубликовать.

Кроме годичных отчетов, составляют сводные отчеты за несколько лет по результатам завершенных работ. Студенты, заканчивающие вуз, представляют такой отчет в форме дипломной работы.

Дипломная работа – это самостоятельное научное исследование, представленное в рукописи к защите перед государственной экзаменационной комиссией.

При защите дипломной работы студент обязан показать, что он хорошо владеет теорией и методами исследований по теме работы, знает литературные источники, умеет критически анализировать результаты

исследований, может делать объективные выводы и давать обоснованные рекомендации.

Дипломная работа должна отвечать определенным требованиям:

• иметь научную и практическую ценность, перспективность, тему и объем, соответствующие силам и возможностям автора;

• иметь реальные условия для выполнения (например, теплицы, тепличное и парниковое хозяйства, согласие руководства теплицы на выполнение исследовательской работы по данной теме и т. д.);

• содержать новые факты или новое освещение уже известных фактов, возможно также обобщение опыта выращивания определенной культуры;

• представлять результаты исследований как минимум за два–три года, т. е. в работе должно быть соблюдено требование повторения во времени;

• мысли автора должны быть изложены ясно и четко, материал подан систематично и последовательно;

• экспериментальные данные должны быть обработаны соответствующими методами математической статистики и проанализированы на экономическую эффективность;

• в тексте рукописи должны быть выделены смысловые абзацы, а вся работа – тщательно отредактирована;

• объем дипломной работы – не более 50–60 стр. машинописного текста, объем каждого раздела должен находиться в определенном соотношении с другими.

Дипломная работа состоит из нескольких разделов.

Введение (1–1,5 стр.). В нем излагают цели и основные направления исследований, ставят задачи по конкретной культуре и теме дипломной работы, указывают место и годы выполнения исследований, перечисляют сотрудников, оказавших помощь в работе, высказывают им благодарность.

Обзор литературы (10 стр.). Перед планированием первого опыта изучают и конспектируют литературу. В течение двух-трех лет будущий дипломник прорабатывает несколько десятков источников литературы на родном языке и не менее пяти – на иностранном. Конспекты систематизируют и составляют план обзора.

Обзор должен быть логичным, последовательным, содержать критическую оценку анализируемых источников, а также отношение автора к результатам других исследователей. Не следует подробно освещать вопросы технологии либо хозяйственного значения культур, они изложены в учебниках и пособиях.

Условия проведения исследований (2–3 стр.). В этой части дипломной работы указывают место проведения исследований – хозяйство, населенный пункт, район, область, зону, описывают почву и подпочву,

на которых проводился опыт, склон, его экспозицию, климатические условия зоны – по данным метеостанции, расположенной не далее 5 км от опытного участка, общий агрофон, внесенные удобрения, их дозы, подкормки, схему посадки растений и уход за ними, погоду за период исследований.

Методика исследований (4–8 стр.). Это один из основных разделов дипломной или другой исследовательской работы. Если методика не отвечает современным требованиям, ставятся под сомнение все полученные результаты. Методику описывают четко, чтобы опыт можно было воспроизвести в аналогичных условиях.

В подразделах приводят: схему опыта с указанием основного и, если имеется, дополнительного контроля; длину и ширину опытной делянки, ее рисунок, площадь учетной делянки; ширину защиток – боковых и концевых, ширину лабораторной полосы; форму опытного участка и повторений, соотношение их сторон; ориентацию делянок; число ярусов в повторении; метод размещения вариантов в опыте, использованную разновидность рандомизации; повторность, доказательство достаточности с помощью формул оптимизации; схематический план опыта, привязанный к конкретной местности; методики учетов и наблюдений. В последнем подразделе указывают авторов методик, а ссылки на их работы помещают в списке литературы. В конце подраздела сообщают, по каким методикам проводилась математическая обработка результатов, а также оценка экономической эффективности рекомендуемых элементов агротехники или технологий возделывания культур.

Результаты исследований и их обсуждение (25–30 стр.). Раздел излагают на основании годичных отчетов. Результаты отчетов анализируют по годам, а также суммарно за все годы, и систематизируют. Все основные показатели (урожай, его качество) и сопутствующие (рост растений, площадь листьев и др.) обрабатывают соответствующими методами математической статистики.

В разделе должно быть примерно 4–7 основных подразделов, изложенных в логичной последовательности. Таблицы не следует перегружать цифрами, так как это затрудняет восприятие материала. В них целесообразно представить данные за каждый год и среднее, например, по такой форме, как в таблице 1.

Динамику изучаемого процесса можно изобразить на графике. График, в свою очередь, должен быть простым, четким, с небольшим числом линий.

Полученные при математической обработке статистические критерии обязательно помещают в таблицу результатов и используют в тексте при анализе данных. Собственные данные сопоставляют с литературными.

Таблица 1

Результаты исследований

Вариант	2015 г.	2016 г.	2017 г.	Среднее
1 ……				
2 ……				
3 ……				
$НСР_{05}$				
$НСР_{01}$				

Изложение должно быть последовательным. Так, результаты опытов, в которых изучали влияние доз минеральных удобрений на рост и урожай растений, можно представить в следующем порядке:

- влияние доз удобрений на химические свойства грунта;
- рост корневой системы и надземной части растений в зависимости от доз удобрений;
- ассимиляционная поверхность и биомасса растений в зависимости от доз удобрений;
- содержание в растениях азота, фосфора, калия и других питательных элементов;
- цветение и плодоношение растений в зависимости от доз удобрений;
- урожай и его качество в зависимости от доз удобрений.

После каждого подраздела делают краткие выводы.

Оценка экономической эффективности. Изучаемые агроприемы, сорта, гибриды и целые технологии, которые существенно превзошли контроль, оценивают с использованием методов экономики. При этом консультируются со специалистами по данной дисциплине.

Охрана окружающей среды (3–4 стр.). Этот вопрос тесно увязывают с направлением исследования, для чего предварительно консультируются с преподавателями соответствующей кафедры.

Выводы и предложения (2 стр.). Общие выводы по дипломной работе делают на основании кратких выводов и заключений, которые были представлены после каждого подраздела в разделе «Результаты исследований и их обсуждение». Выводы не следует заменять констатацией фактов, изложенных в дипломной работе. Выводы – это умозаключения автора, которые вытекают из фактов. Необходимо следить за тем, чтобы выводы полностью соответствовали результатам исследований, а не противоречили им. Излагать выводы следует четко и ясно.

После выводов в одном-двух пунктах дают конкретные рекомендации.

Список литературы должен включать только те источники, на которые есть ссылка в дипломной работе. В алфавитном порядке приводят сначала отечественные, а затем зарубежные работы.

Список литературы

1. *Доспехов, Б. А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) / Б. А. Доспехов. – М.: Агропромиздат, 1985. – 351 с.

2. *Моисейченко, В. Ф.* Основы научных исследований в плодоводстве, овощеводстве и виноградарстве / В. Ф. Моисейченко, А. Х. Заверюха, М. Ф. Трифонова. – М.: Колос, 1994. – 383 с.

ГЛАВА 2
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

2.1. Методы экологического мониторинга, оценка состояния окружающей среды

2.1.1. Биоиндикационные методы

Биоиндикационные исследования основаны на чувствительности ряда организмов (хвойных растений, лишайников, микроорганизмов, пыльцы, некоторых животных) к загрязнению атмосферного воздуха, воды или почвы.

Биоиндикация – совокупность методов и критериев, предназначенных для поиска и изучения информативных компонентов экосистем, которые бы могли:

• адекватно отражать уровень воздействия среды, включая комплексный характер загрязнения с учетом возможных явлений синергизма действующих факторов;

• диагностировать ранние нарушения в наиболее чувствительных компонентах биотических сообществ и оценивать их значимость для всей экосистемы в ближайшем и отдаленном будущем.

Согласно определению Н. Ф. Реймерса, **биоиндикатор** – группа особей одного вида или сообщества, по наличию, состоянию и поведению которых судят об изменениях в среде, в том числе о присутствии и концентрации загрязнителей [7].

Биотестирование (англ. *bioassay*) – процедура установления токсичности среды с помощью тест-объектов, сигнализирующих об опасности независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения жизненно важных функций у тест-объектов. Благодаря простоте, оперативности и доступности биотестирование получило широкое признание во всем мире и чаще всего используется наряду с методами аналитической химии.

Определить качество окружающей среды можно с помощью биотестов. Один из вариантов метода заключается в том, что в реальные условия окружающей среды помещают тест-организмы, оптимальные условия жизни которых и некоторые числовые характеристики известны. В течение эталонного срока наблюдают и измеряют численные параметры жизни тест-организмов, затем их сравнивают с оптимальными. Однако такая оценка не имеет достаточной надежности.

Многолетние стационарные исследования рекреационных лесов. На биоценозы возле автомагистралей оказывают влияние токсические вещества, которые распространяются в виде аэрозолей, паров, газов на расстояние до 150 м от края дорожного полотна (противогололедные агенты, тяжелые металлы и др.). Как следствие возрастающей антропогенной нагрузки в лесных насаждениях происходят необратимые изменения биоценозов: ухудшаются почвенные условия, изменяется гидрологический режим, исчезают некоторые виды растений и животных. Например, маршрутное лесопатологическое обследование на протяжении МКАД (Москва) выявило повреждение около 25 % насаждений (у хвойных – пожелтение и опадение хвои, у лиственных – аномалии развития листьев и побегов).

Многолетние мониторинговые наблюдения за динамикой состояния придорожных насаждений включают организацию трансект. Это постоянные пробные площади (ППП), которые имеют вид полос, отходящих перпендикулярно от магистрали вглубь лесных массивов. Их длина – 100–200 м, ширина – 20 м. Полоса разбивается на секции (квадраты) размером 20×20 м, каждая из которых представляет отдельную ППП. В результате получается цепь последовательно сменяющих друг друга участков, на которых влияние магистрали проявляется в различной степени.

В пределах трансекты проводится сплошной учет деревьев: каждое дерево нумеруется, наносится на план в масштабе 1:100 и подробно описывается: отмечаются класс возраста, диаметр, высота, ярус, общее состояние по шестибалльной шкале (0 – здоровые, 6 – гибель), наличие вредителей, болезней, механических повреждений.

Для каждой секции делается подробный анализ древостоя, естественного возобновления, подлеска, травяно-кустарничкового яруса, живого напочвенного покрова.

Сравнивая эти показатели, можно проследить изменение характера и состояния растительности по мере приближения к магистрали и во времени.

Лихеноиндикация загрязнения воздуха. Лихеноиндикация – это определение качества атмосферного воздуха с помощью лишайников, представляющих собой симбиотический организм, слоевище которого образовано грибом и цианобактерией или водорослью. Лишайники могут приспосабливаться к крайне неблагоприятным условиям внешней среды и растут практически в любых климатических условиях. Различают лишайники:

- накипные (корковые), имеющие слоевище в виде тонкой (гладкой или зернистой, бугорчатой) корочки, очень плотно срастающейся с субстратом (корой, камнем, почвой);

• листоватые (листовидные), имеющие вид мелких чешуек или пластинок и прикрепленные пучками грибных гиф к субстрату, от которого они легко отделяются;

• кустистые, имеющие вид тонких нитей или ветвящихся кустиков, прикрепленные к субстрату своим основанием.

Лишайники высокочувствительны к загрязнению среды обитания. На них избирательно действуют прежде всего вещества, увеличивающие кислотность среды (оксиды азота и серы, фториды, озон, соляная кислота). Для лишайников сравнительно безвредны тяжелые металлы, способные накапливаться в слоевище в значительных количествах, а также радиоактивные изотопы.

С помощью лишайников можно оценить комплексное воздействие промышленных выбросов в обследуемом районе. Для этого территория разбивается на квадраты определенного размера (величина зависит от изучаемой площади). Изучается обрастание лишайниками стволов и ветвей деревьев, камней, стен домов и т. п. и по таблице 2 определяется степень загрязнения воздуха.

Таблица 2

Лихеноиндикация степени загрязнения воздуха

Зона	**Загрязнение**	**Наличие (+) или отсутствие (–) лишайников**		
		кустистые	**листоватые**	**накипные**
1	Нет	+	+	+
2	Слабое	–	+	+
3	Среднее	–	–	+
4	Сильное (лишайниковая пустыня)	–	–	–

Еще одним способом реализации лихеноиндикации является картирование лишайников (по видовому многообразию). Для этого составляется карта обследуемой территории с обозначением на ней строений, автомобильных и железнодорожных коммуникаций, зеленых насаждений и т. п. Исследование территории проводится по квадратам выбранного размера, нанесенным на карту, причем мелкая разбивка дает более точные результаты. Критерием служит видовое богатство лишайников (N), определяемое фактом наличия/отсутствия видов. Полученные цифровые данные наносятся поквадратно на карту. Самые большие значения N (видовое разнообразие лишайников) соответствуют наиболее чистым зонам территории; уменьшение N свидетельствует о присутствии загрязнения; $N = 0$ (лишайниковая пустыня) – показатель сильного загрязнения.

Картирование можно осуществить, используя и другие критерии, например, по форме слоевища, степени его разрушения и т. п.

Биоиндикация загрязнения атмосферы по состоянию хвои сосны. При обследовании повреждений хвои основными параметрами являются прирост побегов, темные верхушечные некрозы хвои, продолжительность жизни хвои сосны. Обследования можно проводить круглогодично.

По карте анализируемого района намечаются точки обследования, при этом чем выше антропогенная нагрузка, тем ближе друг к другу они должны быть расположены (1,5–3 км). В малозагрязненной местности точки обследования могут быть удалены друг от друга на расстояние до 10–15 км. Работа планируется так, чтобы намеченную территорию можно было изучить в течение двух-четырех дней.

В точке обследования находят молодые сосны, произрастающие на открытом месте (на поляне, опушке леса, просеке, вырубке). Из них выбираются пять молодых деревьев высотой 1,5 м, стоящих друг от друга на расстоянии 10–20 м. Если все деревья очень высокие, то обследование проводится с использованием одного из боковых побегов четвертой сверху мутовки.

Определение класса повреждения и усыхания хвои. Некрозы обычно появляются весной сразу после образования хвои, а затем незначительно увеличиваются. Некротические реакции у деревьев, находящихся на продуваемых местах, выражены сильнее, чем в случае густого насаждения.

Объектом обследования является верхушечная часть ствола. Внимательно осматривается хвоя (рисунок 2) участка центрального побега (второго сверху) предыдущего года и по шкале определяется класс повреждения и усыхания (таблица 3) (следует иметь в виду, что шипик на конце хвои всегда более светлый, поэтому его окраска не должна влиять на оценку степени повреждений).

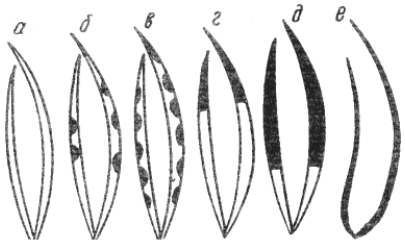


Рис. 2. **Виды повреждения и усыхания хвои:**
***а* – хвоя без пятен (КП1), нет сухих участков (КУ1); *б* – хвоя с небольшим числом мелких пятен (КП2), нет сухих участков (КУ1); *в* – хвоя с большим числом черных и желтых пятен (КП3), усох кончик 2–5 мм (КУ2); *г* – усохла треть хвои (КУ3); *д* – усохло более половины длины хвои (КУ4); *е* – вся хвоя желтая и сухая (КУ4); КП – класс повреждения (некрозы); КУ – класс усыхания хвои**

Таблица 3

Определение класса повреждения и усыхания хвои

Класс	Вид повреждения и усыхания хвои					
	а	**б**	**в**	**г**	**д**	**е**
Повреждения хвои (некрозы)	1	2	3	–	–	–
Усыхание хвои	1	1	2	3	4	4

Определение продолжительности жизни хвои. Продолжительность жизни хвои оценивается при обследовании верхушечной части ствола за последние годы: каждая мутовка, считая сверху, – это год жизни. Определяется, сколько лет сохраняется хвоя (максимальный возраст хвои), причем если на самом нижнем из охвоённых участков часть хвои опала, то оценивается примерная доля сохранившейся хвои.

Таким образом, полный возраст хвои определяется числом участков ствола с полностью сохраненной хвоей плюс доля сохраненной хвои на следующем за ним участке. Например, если верхушечная часть и два участка между мутовками полностью сохранили хвою, а на следующем участке сохранилась ее половина, то показатель продолжительности жизни хвои 3 + ½ = 3½.

Экспресс-оценка загрязнения воздуха. Определив класс повреждения и продолжительность жизни хвои, можно оценить класс загрязненности воздуха по таблице 4.

Таблица 4

Определение класса загрязненности воздуха

Максимальный возраст хвои, лет	Класс повреждения хвои на побегах 2-го года жизни		
	1	**2**	**3**
4	I	I – II	III
3	I	II	III – IV
2	II	III	IV
2	–	IV	IV – V
1	–	IV	V – VI
1	–	–	VI

Примечание. I – идеально чистый воздух; II – чистый; III – относительно чистый («норма»); IV – заметно загрязненный («тревога»); V – грязный («опасно»); VI – очень грязный («вредно»); «–» – невозможное сочетание.

Биоиндикация загрязнения водоемов по состоянию популяций водных растений семейства рясковых. Водные растения, относящиеся к семейству рясковых, используются в качестве биоиндикаторов, так как они широко распространены и обладают высокой чувствительностью к загрязнению водной среды. Все рясковые

плавают на поверхности или слегка погружены в воду. Отдельные растения представляют собой зеленую округлую пластину (щиток) размером 1–10 мм с дочерними щитками («детками»), прикрепленными по бокам материнского щитка. Вырастая, «детки» отделяются и превращаются во взрослые растения, благодаря чему ряски быстро заполняют поверхность водоема.

По карте обследуемого района намечают точки сбора материала, причем чем сильнее загрязнение, тем ближе друг к другу (0,5–1,0 км) они должны быть расположены. На мало загрязненных участках точки сбора могут быть удалены на расстояние 2–3 км друг от друга.

Обследование водоема проводится в течение двух-четырех дней. Наиболее показательным периодом является первая декада июня, дополнительную работу можно повторить в середине июля или в конце августа – начале сентября.

Сбор проводится в бухточке или заливе со спокойным, замедленным течением. Ведром с поверхности приблизительно 0,5 м^2 собирается ряска. Растения (с помощью шумовки) переносятся в сосуд или полиэтиленовый пакет, содержащий необходимое количество воды из водоема. Далее проба (или ее часть), содержащая примерно 150–200 растений, разделяется по видам (рисунок 3).

Рис. 3. **Общий вид водных растений семейства рясковых:**
***а* – многокоренник обыкновенный; *б* – ряска тройчатая; *в* – ряска горбатая**

После разбора пробы по видам производится подсчет:

• числа растений (особей) каждого вида (одно растение – материнский щиток с прикрепленными к нему «детками», если они есть);

• общего числа щитков (суммарное количество материнских щитков и «деток») каждого вида;

• числа щитков с повреждениями (черные и бурые пятна – некроз, пожелтение – хлороз; количество и размер пятен не учитываются).

Для экспресс-оценки качества воды используется самый массовый вид растений (обычно ряска малая). Определение качества воды проводится по таблице 5 на основании доли щитков с повреждениями.

Таблица 5

Определение класса качества воды

Щитки с повреждениями, %	Отношение щитков к особям				
	0,1	**1,3**	**1,7**	**2**	**2**
0	1–2	2	3	3	3
10	3	3	3	3	3
20	3	4	3	3	3
30	4	4	3	3	3
40	4	4	4	3	3
50	4	4	4	3	–
50	4	4	4	–	–
50	5	5	–	–	–

Примечание. Первая колонка соответствует тем случаям, когда в целой пробе не удалось набрать 30 экземпляров даже наиболее массового вида.

Условные обозначения: 1 – очень чистая вода; 2 – чистая; 3 – умеренно загрязненная; 4 – загрязненная; 5 – грязная; «–» – комбинация, встречаемость которой исключается.

Беспозвоночные животные – биоиндикаторы загрязнения малых рек. Проблема загрязнения малых рек – одна из наиболее острых для большинства густонаселенных регионов Беларуси. Вода малых рек все чаще оказывается непригодной не только для питья, но и для хозяйственных нужд. Неочищенные сбросы промышленных предприятий, отходы животноводческих ферм, коммунально-бытовые стоки городов и поселков – вот далеко не полный перечень источников загрязнения вод малых рек.

Качество вод в естественных водоемах Беларуси оценивается в настоящее время по результатам химического, бактериологического и биологического анализов. Для их выполнения требуются сложное оборудование, длительное время и высокая квалификация сотрудников.

В последние десятилетия осуществляется большой объем исследований влияния стрессоров на жизненные функции и выживаемость водных организмов, предложен ряд методических разработок по использованию живых индикаторов для контроля качества воды в проточных водоемах. Среди них для биоиндикации были выделены наиболее характерные таксоны беспозвоночных, наличие или отсутствие которых в донных отложениях характеризует уровень загрязнения воды. В качестве индикаторных групп выступают как отдельные виды, так и таксоны более высокого ранга: роды, семейства, отряды, классы, типы, а также экологические группы (разные таксоны, объединяемые в одну группу по сходству экологии и биологии входящих в нее видов).

Многие индикаторные организмы представлены гетеротопными насекомыми, находящимися в личиночной стадии. Поэтому для обследования рек необходимо выбирать периоды либо до вылета насекомых, либо после вылета, т. е. весну или начало осени.

Отбор и обработка проб для биологического анализа. Количество участков реки, выбираемых для исследования, определяется целями работы. Для проведения анализа качества воды на всем протяжении водотока места отбора проб выбираются через равные интервалы от истока до устья. Если исследуется влияние конкретного источника загрязнения, то качество воды может определяться на небольшом числе участков ниже и выше по течению от него.

При выборе участков отбора проб следует учитывать ряд условий. На них не должно быть мелководий с густой водной растительностью, а также мест с застойной водой. В обоих случаях донное население может значительно отличаться от такового на участках реки с нормальной скоростью течения воды.

Пробы грунта с обитающими в нем донными организмами отбирают с помощью специальных приспособлений: закидной драги и сачкового скребка, затем в них же они промываются и помещаются в эмалированные емкости с крышками.

Отбор организмов из промытого грунта обычно ведется на месте отбора проб. При этом небольшая порция грунта переносится в кювету с водой, а с помощью пинцета животные перекладываются в баночки с 4%-ным раствором формалина. На баночки наклеиваются этикетки. Допускается разбор проб и в лаборатории.

Определение класса качества речной воды. Определение уровня загрязнения воды по методу С. Г. Николаева производится с помощью шкалы (таблица 6), которая устанавливает шесть классов качества. Для каждого из них в ходе многолетних наблюдений были найдены свои индикаторные таксоны, которые в водах других классов встречаются редко. Так, личинки веснянок, характерные для вод 1-го класса, в более загрязненных водах 2-го класса встречаются редко, а в водах 3-го класса – практически никогда. Признаком принадлежности воды к 6-му классу служит полное отсутствие крупных беспозвоночных. В таблице 6 кроме списка таксонов, соответствующих определенному классу вод, приводится условная значимость каждого из них. Эта величина нужна для последующей количественной оценки уровня загрязнения.

Для определения класса качества воды обследованного участка реки среди пойманных организмов отбираются представители индикаторных таксонов, а их названия записываются в рабочую таблицу 7 в строгом соответствии с их положением в классах шкалы качества воды. Организмы, не относящиеся к индикаторным таксонам, не учитываются.

Таблица 6

Шкала качества воды

Индикаторные таксоны	Условная значимость каждого таксона в классе, единицы	Класс качества воды
Личинки веснянок. Личинки ручейника рода риакофила	50,0	1-й, очень чистая
Губки. Плоские личинки поденок. Личинки ручейника рода нейреклепсис. Личинки вилохвосток	25,0	2-й, чистая
Роющие личинки поденок. Личинки ручейников при отсутствии риакофил и нейреклепсисов. Личинки стрекоз красотки и плосконожки. Личинки мошек. Водяной клоп. Крупные двустворчатые моллюски. Моллюски-затворки	14,2	3-й, удовлетво- рительно чистая
Личинки стрекоз при отсутствии красотки и плосконожки. Личинки вислокрылок. Водяной ослик. Плоские пиявки. Мелкие двустворчатые моллюски	20,0	4-й, загрязненная
Мотыль (в массе). Крыски (личинки мух-пчеловидок). Трубочник (в массе). Червеобразные пиявки при отсутствии плоских	25,0	5-й, грязная
Макробеспозвоночные отсутствуют	–	6-й, очень грязная

Таблица 7

Рабочая таблица определения качества воды

Класс качества воды	Обнаруженные индикаторные организмы	Условная значимость таксонов в пределах класса, единицы	Количество обнаруженных таксонов	Суммарная значимость обнаруженных таксонов, единицы
1-й				
2-й				
3-й				
4-й				
5-й				

После внесения в таблицу 7 всех обнаруженных в пробах индикаторных таксонов в каждом разделе (классе) второй графы подсчитывается число таксонов и умножается на величину условной значимости данной группы таксонов (графа 2). Найденная суммарная значимость таксонов заносится в графу 5 в раздел соответствующего класса. Класс качества воды на обследованном участке определяется по максимальной классовой значимости одной из групп таксонов.

Помимо рассмотренной выше, существуют и другие методики оценки степени загрязнения водоема по составу водных беспозвоночных. Одна из таких методик предусматривает классификацию биологического анализа качества воды в естественном водоеме по трем группам таксонов крупных беспозвоночных (таблица 8).

Таблица 8

Классификация таксонов крупных организмов по отношению к чистоте воды

Таксоны 1-й группы	Таксоны 2-й группы	Таксоны 3-й группы
Личинки поденок Личинки (нимфы) веснянок Личинки вислокрылок Личинки ручейников Двустворчатые моллюски	Личинки комара-долгоножки Личинки стрекоз Речные раки Бокоплавы Моллюски (катушки и лужанки)	Личинки комара-звонца (мотыль) Моллюски-прудовики Пиявки Водяные ослики Личинки мошки Олигохеты

Организмы первой группы погибают в грязной воде. Преобладание их – признак очень чистой воды.

Организмы второй группы могут существовать в воде различной степени загрязненности.

Организмы третьей группы выживают даже в очень грязной воде. Преобладание их – признак повышенного загрязнения воды (рисунок 4).

Рис. 4. **Таксономические группы беспозвоночных, помогающие определить степень загрязнения воды**

По количеству индикаторных таксонов и численности особей каждого из них в пробах можно определить, относится ли вода обследованного участка к загрязненной, малозагрязненной или чистой.

Определение интенсивности выделения углекислого газа почвой как биотест на плотность ее заселения живыми организмами. Экологически чистая почва густо населена живыми организмами. Все они дышат, поглощая кислород и выделяя углекислый газ. Простейшие содержатся в количестве более миллиона экземпляров в 1 г почвы. Насекомые и их личинки исчисляются тысячами экземпляров на 1 м^2, клещи – десятками тысяч, нематоды – миллионами. Число позвоночных в некоторых почвах достигает нескольких тысяч на 1 га. Поэтому в почвенном воздухе кислорода содержится обычно меньше, чем в атмосферном, а углекислого газа – больше (таблица 9).

Таблица 9

Состав атмосферного и почвенного воздуха.

Воздух	Содержание O_2, %	Содержание CO_2, %
Атмосферный	21	0,034
Почвенный	11–21	0,034–8,0

Чем гуще заселена почва, тем больше выделяется углекислого газа. Таким образом, почвенные организмы в данном случае выступают в роли биоиндикаторов почвенной среды. Количественным показателем биоиндикации служит скорость выделения организмами углекислого газа, определяемая по его массе с 1 га в 1 ч. Чем больше эта скорость, тем биологически активней и благополучней почва.

Выделение углекислого газа в летний период может достигать 7,5 кг/га в 1 ч, а в очень загрязненных промышленными отходами почвах – всего 0,0096 кг/га в 1 ч.

Чтобы оценить уровень биологической активности почвы, нужно непосредственно измерить количество углекислого газа, которое выделяет почва или какой-либо другой субстрат. Принцип такого измерения состоит в том, что небольшой участок поверхности почвы изолируется от окружающего воздуха сосудом, внутрь которого помещается чашка с раствором щелочи, поглощающей углекислый газ. Через определенный промежуток времени сосуд-изолятор снимается и щелочь из чашки оттитровывается кислотой.

В исследованиях, где требуется высокая точность, учитывается исходное количество углекислого газа, находящееся в атмосферном воздухе под колпаком-изолятором. Следует отметить, что количество углекислого газа невелико и полученной поправкой можно пренебречь.

Изучение степени запыленности воздуха. Для выполнения задания по изучению запыленности воздуха в исследуемой местности необходим контрольный пункт. Им может служить город, конкретно листва деревьев вдоль главной улицы или листва деревьев вдоль до-

роги, проходящей через лес, который выбирается в качестве объекта исследования. Для сравнения берется листва деревьев на определенном расстоянии от дороги (таких точек должно быть не менее трех). Маршрут наносится на план-схему местности.

В выбранных местах необходимо собрать листья растений и приложить к ним прозрачную клеящуюся пленку. Затем снять пленку и той стороной, где отпечатался контур листа вместе со слоем пыли, прикрепить к белой бумаге. Следует сравнить степень запыленности листьев деревьев из разных мест и сделать вывод о причинах наблюдаемого явления.

Определение загрязнения воздуха микроорганизмами. Для определения загрязнения воздуха микроорганизмами необходимо предварительно подготовить чашки Петри с питательной средой.

Перед экскурсией в лес следует выявить состав микроорганизмов в воздухе помещения, оставив для этого открытые чашки Петри с питательной средой в комнате на 20–30 мин, затем закрыть их и поместить в специально отведенное место при комнатной температуре и пометить их буквой К (контроль).

В этот же день следует взять в чашки Петри пробы воздуха в нетронутой части леса и там, где ярко выражены следы деятельности человека. После экскурсии чашки Петри ставятся рядом с предыдущими и помечаются буквой О (опыт).

Через два-три дня в чашках появятся колонии. Важно рассмотреть их и зарисовать.

Для определения степени загрязнения воздуха микроорганизмами требуется подсчитать в чашках Петри количество колоний разных микроорганизмов, стараясь учесть даже мелкие колонии, полученное число колоний разделить на время выдержки в минутах и умножить на 7644 (коэффициент пересчета площади чашки Петри на 1 $м^2$).

Использование лабораторных животных в токсикологических исследованиях. При моделировании токсических эффектов химических веществ наиболее часто используются грызуны (мыши, крысы, морские свинки, кролики).

Белые лабораторные мыши, являющиеся альбиносами домашней серой мыши, используются для определения токсичности химических веществ, стандартизации фармакологических препаратов.

Морские свинки являются классическим объектом для изучения аллергенности химических веществ, а также проявлений авитаминозов. Изолированные органы этих животных применяются в фармакологических исследованиях.

Кролики в связи с особенностями протекания у них овуляторного цикла и высокой скоростью размножения удобны для выявления воздействия токсических веществ на репродуктивные функции.

Лабораторные крысы (альбиносы черной и серой крыс) являются наиболее распространенным видом экспериментальных животных для разработки моделей последствий острых и хронических интоксикаций. Удобство использования крыс для исследования токсических эффектов химических и биологических препаратов объясняется простотой их содержания, возможностью размещения на сравнительно небольшой территории достаточного количества животных, небольшим весом, устойчивостью к инфекционным заболеваниям, большим приплодом, который они дают. Крыс легко фиксировать рукой; постоянная заполненность желудка пищей при обычном режиме питания позволяет вводить им интрагастрально достаточные дозы токсических агентов, не вызывая катаральных изменений слизистой. Предпочтение в токсикологических исследованиях отдается самцам, так как они не имеют гормональных колебаний, способных оказывать влияние на мембранотропное действие ядов; целесообразнее использование молодых животных, поскольку у них меньше толерантность к различным токсическим веществам.

Из птиц наиболее часто при проведении токсикологических экспериментов используют кур, уток, гусей, индеек. Птицы являются удобной моделью для проведения исследований влияния химических веществ на метаболические процессы, поскольку они протекают быстрее и интенсивнее, чем у других животных. Однако следует учитывать, например, что у последних нет потовых и сальных желез, а также мочевого пузыря, что имеет существенное значение для определения клиренса выведения токсических агентов и их метаболитов. Состав крови и мочи птиц существенно отличается от соответствующих физиологических показателей других животных. В отличие от млекопитающих птицы имеют особенности в строении желудочно-кишечного тракта, у них по-другому протекают процессы переваривания корма. В исследованиях на птицах удовлетворительным критерием является изменение массы тела.

Проведение токсикологических исследований на крупных млекопитающих (собаках, кошках, обезьянах) обусловлено наибольшей схожестью строения и функционирования их внутренних органов и систем, а также метаболических процессов с таковыми у человека.

Обезьяны, несмотря на сложность их содержания, используются в токсикологической практике при изучении влияния химических веществ на функции центральной нервной системы.

Кошки как объект исследования чаще всего применяются в острых токсикологических экспериментах. Кроме того, их изолированные органы задействуют в целях выявления физиологических изменений при действии химических веществ.

В клинической токсикологии часто используются собаки. Наиболее пригодными считаются беспородные короткошерстные собаки со сред-

ней массой тела 10–15 кг, поскольку чистопородные животные более прихотливы в содержании. Оптимальный возраст животных – 1,5–5 лет. В условиях проведения эксперимента необходимо учитывать, что собаки являются стайными животными с развитой иерархической системой, половыми и индивидуальными различиями темперамента, поэтому рекомендуется одиночное размещение собак в отдельных боксах. Собаки достаточно легко обучаются, что можно использовать при проведении некоторых процедур, ограничивая применение средств фиксации.

Использование беспозвоночных животных для оценки экологического состояния почвы. Почвообитающие беспозвоночные чутко реагируют на все изменения почвенных процессов сдвигом численности отдельных групп или сменой видового состава животных.

Общий теоретический принцип биологической диагностики заключается в том, что виды с широкой экологической амплитудой (эврибионты) мало пригодны для индикационных целей, тогда как экологически узковалентные виды (стенобионты) служат хорошими индикаторами определенных условий среды и свойств субстрата.

Не все группы почвенных животных равнозначны с точки зрения их диагностической ценности. Менее других полезны микроскопические формы: простейшие и микроартроподы (клещи, ногохвостки). Их представители отличаются космополитизмом и почва для них не выступает как единая среда обитания, а они живут в системе пор, капилляров, полостей. Среди простейших в качестве показателей почвенных условий могут быть использованы раковинные амебы. Их легче, чем других простейших, определять по строению их раковинок, которые могут сохраняться в почве. Из микроартропод наиболее хорошо изучены индикаторные свойства у панцирных клещей.

Особенно ценны и удобны для индикационных работ в почвоведении комплексы крупных беспозвоночных (дождевые черви, многоножки, личинки насекомых), которые в меньшей степени космополиты, чем простейшие и микроартроподы. Их ареалы лучше изучены и характеризуются определенным комплексом почвенно-климатических условий.

Основой для развития почвенно-альгологических работ служит положение о том, что зональности почв и растительности соответствует и зональность водорослевых группировок. Она проявляется в общем видовом составе и комплексе доминантных видов водорослей, в наличии специфических видов, в характере распространения по почвенному профилю, в преобладании определенных жизненных форм.

Для биотестирования почвенных образцов чаще всего применяют дождевых червей, олигохет (кольчатых червей) и различных насекомых. Дождевые черви выступают в качестве индикаторов функции почвы как естественной среды обитания при проведении теста на острую токсичность, репродуктивного теста, теста на биомассу.

Биотестирование проводят в деревянных или пластмассовых ящиках размером 30×30 см и высотой 15–20 см. Ящики должны иметь снизу дренажные отверстия для слива излишков воды. Тестируемую и контрольную почву помещают в ящики и увлажняют отстоянной водопроводной водой до влажности 75–85 %. В качестве контроля используют почву с территории заповедника или лесного массива, заведомо не содержащую токсичные вещества.

Методика основана на определении выживаемости и поведенческих реакций дождевых червей при воздействии токсических веществ, содержащихся в тестируемой почве по сравнению с контролем.

Кратковременное биотестирование – до двух суток – позволяет определить острое токсическое действие почвы на дождевых червей по их выживаемости и поведенческим реакциям. Показателем выживаемости служит среднее количество тест-объектов, выживших в тестируемой почве и в контроле за определенное время. Критерием токсичности выступает гибель 50 и более процентов дождевых червей за двое суток в тестируемой почве по сравнению с контролем. Показателем поведенческих реакций тест-объектов является скорость зарывания в субстрат. Критерием токсичности выступает отсутствие зарывания дождевых червей в тестируемую почву, активное ползание по поверхности земли и попытки к выползанию из ящика.

Длительное биотестирование – до 30 суток – позволяет определить хроническое токсическое действие почвы на дождевых червей по снижению их выживаемости и плодовитости. Показателем выживаемости служит среднее количество тест-объектов, выживших в тестируемой почве в течение биотестирования. Показателем плодовитости – среднее количество молоди (включая и количество коконов, умноженное на два, т.е. число зародышей) в пересчете на одну особь выживших дождевых червей.

2.1.2. Метод сорбционных лизиметров в экологических исследованиях

Лизиметрический метод нашел широкое применение в почвенно-агрохимических, мелиоративных, экологических и гидрологических исследованиях. Особенно эффективно его сочетание с методом радиоактивных индикаторов. Подобный подход позволяет количественно оценить пространственное перераспределение в почвенном профиле водорастворимых соединений (продуктов почвообразования, токсикантов и др.) и установить их качественный состав.

Своеобразие свободных почвенных растворов (лизиметрических вод) обусловлено не только спецификой компонентного состава водорастворимых органических веществ (ВОВ) и их свойствами, но и особенностями самого растворителя.

После контакта атмосферных осадков с древесным и наземным покровами происходит радикальное изменение состава воды (она существенно обогащается компонентами ВОВ и различными группами микроорганизмов) и ее свойств (поверхностно-активные вещества, имеющиеся в молекулярных структурах ВОВ, заметно уменьшают величину поверхностного натяжения растворителя, способствуя лучшей смачиваемости гидрофобных гумусовых и минеральных соединений почвы).

В то же время вода и растворенные в ней компоненты ВОВ (особенно продукты кислотной природы) в значительной мере определяют процессы мобилизации и трансформации веществ, содержание и формы миграции не только типоморфных веществ, но и тяжелых металлов и радионуклидов.

По целевому назначению лизиметры классифицируются на почвенно-агрохимические и гидрологические.

Почвенно-агрохимические лизиметры представляют собой:

- лизиметры как долговременные стационарные сооружения инженерного типа;
- насыпные лизиметры переносного типа;
- лизиметрические воронки, цилиндры или плоские лизиметры.

Гидрологические лизиметры обычно имеют цилиндрическую форму. Их высота – от 1 до 3–5 м, рабочая площадь (испаряющая поверхность) – не менее 0,3 м^2, диаметр – около 60 см. Нижние 20–30 см заполняются дренажом – песчано-гравийной засыпкой, которую вначале заливают водой. В оставшийся объем вносят почву (нарушенного или ненарушенного сложения). Между почвой и дренажом помещают обратный фильтр. Все гидрологические лизиметры снабжены водомерными устройствами.

Основные положения, определяющие сущность метода сорбционных лизиметров:

- конструктивные особенности используемых сорбционных лизиметров;
- сорбенты, применяемые при решении конкретных экспериментальных задач;
- схема и методы фракционирования компонентов ВОВ или металлорганических комплексов, поглощенных сорбентами;
- идентификация органических веществ в растворах соответствующими методами;
- определение масштаба миграции веществ, коэффициентов мобилизации и миграции.

Форма и устройство сорбционных колонок не имеют решающего значения. Главным фактором является природа используемого сорбента.

Сорбент, используемый в сорбционных лизиметрах, должен удовлетворять следующим требованиям:

• обратимо сорбировать большие количества исследуемых веществ (т. е. быть емким);

• не вступать в химические взаимодействия с растворителем и сорбируемыми веществами;

• обладать устойчивостью к почвенной среде и способностью возможно легкой регенерации;

• обеспечивать достаточную скорость фильтрации раствора (не менее 0,5 мл/мин).

Определяющими факторами, от которых зависит величина сорбции веществ, являются: pH раствора, концентрация в нем веществ, размеры колонки, объем проходящего раствора, скорость фильтрации.

Наиболее часто применяемые сорбенты – это окись алюминия безводная (Al_2O_3), активированный уголь, органические синтетические ионообменные смолы.

2.1.3. Химические и физические методы мониторинга воздуха, почвы, водных объектов, загрязнения продуктов питания

Экологический мониторинг – комплексная система наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния биосферы под влиянием естественных и антропогенных факторов.

Измерение и нормирование качества окружающей среды обычно проводят по природным средам – атмосферному воздуху, воде, почве. Кроме того, измеряют качество питьевой воды и продуктов питания, а также различные экологические факторы (радиационное загрязнение, интенсивность шума, освещенность и т. д.).

Экологическое нормирование предполагает учет допустимой нагрузки на экосистему. Допустимой считается такая нагрузка, под воздействием которой отклонение от нормального состояния системы не превышает естественных изменений, а следовательно, не вызывает нежелательных последствий у живых организмов и не ведет к ухудшению качества среды.

Установлены предельно допустимые концентрации (ПДК) более чем 1000 химических веществ в воде, более 200 – в атмосферном воздухе и более 30 – в почве. Регламентируется также загрязнение продуктов питания человека. Разработаны нормативы для физических факторов воздействия – шума, вибрации, магнитного и электромагнитного излучения, радиационного воздействия, теплового загрязнения и биологического загрязнения патогенной микрофлорой.

Под качеством атмосферного воздуха понимают совокупность свойств атмосферы, определяющую степень воздействия физических,

химических и биологических факторов на людей, растительный и животный мир, а также на материалы, конструкции и окружающую среду в целом (ГОСТ 17.2.1.03-84). Нормативами качества воздуха определены допустимые пределы содержания вредных веществ как в производственной, так и в селитебной (предназначенной для размещения жилого фонда, общественных зданий и сооружений) зонах.

Питьевая вода должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу и иметь благоприятные органолептические свойства (СанПиН 2.1.4.559–96). Под качеством воды в целом понимается характеристика ее состава и свойств, определяющая ее пригодность для конкретных видов водопользования (ГОСТ 17.1.1.01–77). При определении качества природных вод обычно учитывают следующие показатели: температуру, количество взвешенных частиц, мутность, цветность, прозрачность, кислотность, щелочность, жесткость, электропроводность, концентрацию кислорода, окисляемость, биохимическое потребление кислорода, содержание различных веществ, коли-индекс (число бактерий группы кишечных палочек в единице объема).

Для определения качества почвы используется предельно допустимая концентрация веществ в пахотном слое почвы (ПДКП), которая не должна оказывать прямого или косвенного отрицательного влияния на соприкасающиеся с почвой среды и на здоровье человека, а также на самоочищающуюся способность почвы.

Предельно допустимая концентрация (допустимое остаточное количество) вредного вещества в продуктах питания (ПДКпр) – концентрация вредного вещества в продуктах питания, которая в течение продолжительного времени (при ежедневном воздействии) не вызывает заболеваний или отклонений в состоянии здоровья человека. При разработке нормативов ПДКпр учитываются материалы по токсикологии и гигиеническому нормированию данных веществ в различных объектах природной среды (в воздухе, воде, почве), а также информация о естественном содержании различных химических элементов в пищевых продуктах.

Для определения содержания различных веществ в природных средах широко используются химические методы.

Химические методы – это совокупность качественных и количественных методов анализа веществ, основанных на применении химических реакций.

Качественные химические методы анализа включают использование реакций обнаружения, характерных для неорганических ионов в растворах и для функциональных групп органических соединений. Эти реакции обычно сопровождаются изменением окраски раствора, образованием осадков или выделением газообразных продуктов.

К количественным химическим методам анализа обычно относят «классические» методы: гравиметрию, титриметрию с визуальной индикацией конечной точки титрования, седиментационный анализ и газоволюмометрию.

Газоволюмометрия (газовый объёмный анализ) основана на избирательной абсорбции составных частей газовой смеси в сосудах, заполненных тем или иным поглотителем, с последующим измерением уменьшения объёма газа с помощью бюретки. Так, диоксид углерода поглощают раствором гидроксида калия, кислород – раствором пирогаллола, монооксид углерода – аммиачным раствором хлорида меди. Газоволюмометрия относится к экспрессным методам анализа.

Гравиметрический анализ (весовой анализ, гравиметрия) – количественный аналитический метод, основанный на точном измерении массы определяемого вещества или его составных частей, выделяемых в химически чистом состоянии или в виде соединений точно известного постоянного состава. Этот метод разработал шведский химик Т. У. Бергман. В его основе лежит закон сохранения массы веществ при химических превращениях.

Для качественного анализа используют не только химические, но и физические и физико-химические методы, например, люминесценцию (многие вещества светятся при УФ-облучении) или фотометрию пламени (летучие соединения ионов щелочных и щелочно-земельных металлов придают пламени горелки характерную окраску).

Для получения правильных результатов необходимы реакции, выполнению которых не мешают другие присутствующие ионы. Для этого нужны специфические (взаимодействующие только с определяемым ионом) или хотя бы биселективные (избирательные) реагенты.

Примером реакции с участием специфического реагента является выделение газообразного NH_3 при действии сильных оснований (KOH или NaOH) на вещество, содержащее ион NH_4. Ни один катион не помешает обнаружению иона NH_4, потому что только он реагирует со щелочами с выделением NH_3. Диметилглиоксим (реагент Чугаева) служит примером селективного реагента: в щелочной среде он реагирует с ионами Ni^{2+}, Co^{2+}, Fe^{2+}, а в кислой – только с ионами Pd^{2+}.

Физико-химические методы анализа основаны на зависимости физических свойств вещества от его природы, причем аналитический сигнал представляет собой величину физического свойства, функционально связанную с концентрацией или массой определяемого компонента. Они могут включать химические превращения определяемого соединения, растворение образца, концентрирование анализируемого компонента, маскирование мешающих веществ и др. В отличие от «классических» химических методов анализа, где аналитическим сигналом служит масса вещества или его объем, в физико-химических методах анализа в ка-

честве аналитического сигнала используют интенсивность излучения, силу тока, электропроводность, разность потенциалов и др.

Важное практическое значение имеют методы, основанные на исследовании испускания и поглощения электромагнитного излучения в различных областях спектра. К ним относятся спектроскопия (например, люминесцентный анализ, спектральный анализ), нефелометрия, турбидиметрия и др. Важными физико-химическими методами анализа являются электрохимические методы, использующие измерение электрических свойств вещества (вольтамперометрия, кондуктометрия, кулонометрия, потенциометрия и т. д.), а также хроматография (например, газовая хроматография, жидкостная хроматография, ионообменная хроматография, тонкослойная хроматография). Успешно развиваются методы, основанные на измерении скоростей химических реакций (кинетические методы анализа), тепловых эффектов реакций (калориметрия), а также на разделении ионов в магнитном поле (масс-спектрометрия).

Почти во всех физико-химических методах анализа применяют методы прямых измерений и титрования.

В прямых методах используют зависимость аналитического сигнала от природы анализируемого вещества и его концентрации. Зависимость сигнала от природы вещества – основа качественного анализа. В некоторых методах связь аналитического сигнала с природой вещества установлена строго теоретически.

К методам количественного анализа с помощью физико-химических измерений относят:

1) метод градуировочного графика – измеряют интенсивность аналитического сигнала у нескольких стандартных образцов или стандартных растворов и строят градуировочный график в координатах $I = f(c)$ или $I = f(lgc)$, где c – концентрация компонента в стандартном растворе или стандартном образце. В тех же условиях измеряют интенсивность сигнала у анализируемой пробы и по градуировочному графику находят концентрацию;

2) метод молярного свойства – применяют в тех случаях, когда уравнение связи $I = bc$ соблюдается достаточно строго. Измеряют аналитический сигнал у нескольких стандартных образцов или растворов и рассчитывают $b = I_{ст} / c_{ст}$; если $c_{ст}$ измеряется в моль/л, то b – молярное свойство. В тех же условиях измеряют интенсивность сигнала у анализируемой пробы I_x и по соотношению $c_x = I_x / b$ или $c_x = c_{ст} I_x / I_{ст}$ рассчитывают концентрацию;

3) метод добавок – измеряют интенсивность аналитического сигнала пробы I_x, а затем интенсивность сигнала пробы с известной добавкой стандартного раствора $I_{x+стт}$. Концентрацию вещества в пробе рассчитывают по соотношению $c_x = c_{ст} I_x / (I_{x+ст} - I_x)$.

Методы титрования позволяют измерить интенсивность аналитического сигнала I в зависимости от объема V добавленного титранта. По кривой титрования $I = f(V)$ находят точку эквивалентности и рассчитывают результат по обычным формулам титриметрического анализа.

Физико-химические методы анализа часто используют при определении низких содержаний (порядка 10^{-3} % и менее), где классические химические методы анализа обычно неприменимы. В области средних и высоких концентраций химические и физико-химические методы анализа успешно конкурируют между собой, взаимно дополняя друг друга.

Физические методы анализа – совокупность методов качественного и количественного анализа веществ, основанных на измерении физических характеристик, обусловливающих химическую индивидуальность определяемых компонентов. Физические методы анализа делят на три группы: спектроскопические, ядерно-физические и радиохимические.

Из спектроскопических методов наиболее распространен атомно-эмиссионный анализ. Атомы или ионы, возбужденные дуговым, искровым разрядом, высокочастотной или индукционной плазмой, испускают световую энергию. Каждый элемент характеризуется своим набором спектральных линий. Интенсивность излучения данного элемента определяется его концентрацией в анализируемой пробе. Характерной особенностью атомно-эмиссионного анализа является возможность одновременного определения нескольких элементов. Абсолютный предел обнаружения некоторых элементов достигает 10 г.

Широко распространен атомно-абсорбционный анализ, основанный на измерении поглощения света свободными атомами элементов.

В основе атомно-флуоресцентного анализа лежит спонтанный переход атомов, возбужденных световым потоком, в исходное состояние, сопровождаемый флуоресценцией.

В рентгеноспектральных методах пробу облучают потоком электронов. По величине возникающего при этом рентгеновского излучения судят о содержании определяемого вещества в пробе. В другом варианте метода пробу облучают не электронами, а рентгеновскими лучами и определяют интенсивность вторичного излучения (рентгенофлуоресцентный анализ). Рентгеновские методы пригодны для локального анализа (фокусируют пучок электронов) без разрушения анализируемого образца.

Масс-спектрометрические методы основаны на разном отклонении в магнитном поле различных по массе ионов, которые получают ионизацией исследуемого вещества, например, в искре. Эти методы часто применяют для определения примесей в материалах. Метод позволяет одновременно определять до 70 химических элементов примесей

в твердых веществах. Абсолютный предел обнаружения элементов достигает 10^{-15} г.

Из ядерно-физических методов наиболее значим радиоактивационный анализ, в котором вещество облучают нейтронами, гамма-квантами или заряженными частицами. При взаимодействии облучающих частиц с ядрами атомов элементов в веществе в результате ядерных реакций образуются радиоактивные «дочерние» элементы или изотопы. По величине их радиоактивности судят о количестве определяемого элемента в пробе.

К радиохимическим относится метод изотопного разбавления. К анализируемому образцу прибавляют радиоактивный изотоп определяемого элемента, а после установления химического равновесия каким-либо способом выделяют определенную часть данного элемента. Далее измеряют радиоактивность этой выделенной части и по ее значению рассчитывают содержание элемента в пробе.

Физические методы анализа характеризуются высокой производительностью, низкими пределами обнаружения элементов, объективностью результатов анализа, высоким уровнем автоматизации. Их используют при анализе горных пород и минералов. Например, атомно-эмиссионным методом определяют вольфрам в гранитах и сланцах, сурьму, олово и свинец в горных породах и фосфатах; атомно-абсорбционным – магний и кремний в силикатах; рентгенофлуоресцентным – ванадий в ильмените, магнезите, глиноземе; масс-спектрометрическим – марганец в лунном реголите; нейтронно-активационным – железо, цинк, сурьму, серебро, кобальт, селен и скандий в нефти; методом изотопного разбавления – кобальт в силикатных породах.

Физические факторы окружающей среды контролируются при мониторинге шумового, электромагнитного и радиационного загрязнения окружающей среды.

Шумом называют звуковые колебания, выходящие за рамки звукового комфорта человека. Различают неупорядоченные и упорядоченные (мешают восприятию нужных звуков) звуковые колебания. Человек воспринимает звук в пределах от 16 до 20 тыс. герц (Гц), ниже – инфразвук, выше – ультразвук. К основным характеристикам шума относят звуковое давление (P), интенсивность (I), уровень шума (L), мощность источника (W). При помощи шумомера шум измеряется в белах или десятой части – децибелах (дБ). Основными источниками шума являются все виды транспорта, промышленные предприятия, бытовое оборудование. Уровень шума электропилы достигает 120 дБ, электробритвы – 75–80 дБ, дыхания – 25–30 дБ, шепота – 8–10 дБ. Вредное воздействие шума на организм человека выражается в нарушении работы сердечно-сосудистой и нервной систем, снижении работоспособности и производительности труда.

Электромагнитное загрязнение среды возникает в результате изменения электромагнитных свойств, приводящих к нарушениям работы электронных систем и изменениям на клеточном и молекулярном уровнях живых организмов. Электромагнитное поле характеризуется напряженностью электрического (*E*, В/м) и магнитного (*H*, А/м) полей. Источниками электромагнитного поля являются радио- и телепередающие устройства, бытовые приборы, высоковольтные линии электропередач. Нормативы напряженности, по данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), для электрического поля составляют 5×10^3 *В*/м, для магнитного – 80 *А*/м.

В нашей стране создана и функционирует система радиационного мониторинга, вошедшая в национальную систему мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. В ее состав входит широкая сеть пунктов наблюдений и аккредитованных лабораторий. Основные объекты мониторинга – атмосферный воздух, почва, поверхностные и подземные воды. Контролируемые параметры – мощность дозы гамма-излучения, запас радионуклидов в почве, удельная активность объектов мониторинга. Для проведения радиометрических измерений применяют дозиметры, радиометры.

Система нормирования в области радиационной безопасности строится на понятии дозовой нагрузки. Закон «О радиационной безопасности населения» устанавливает допустимую годовую дозовую нагрузку для населения не более 0,001 Зв (0,1 рентгена), допустимая доза за 70 лет жизни – 0,07 Зв (7 рентген). В отдельные годы допустимая доза может быть превышена, но при условии, что средняя годовая доза за пять лет подряд не превысит те же 0,001 Зв.

Облучение, создаваемое внутри зданий радиоактивными примесями, которые могут содержаться в строительных материалах, оценивается следующим образом: уровень радиации внутри жилого дома может быть выше, чем снаружи, не более чем на 30 мкР/ч. Если он превышает наружный уровень на 60 мкР/ч или больше, жильцы должны быть переселены, а здание не следует использовать как жилое. Содержание радона в воздухе внутри вновь строящихся домов должно быть не более 100 Бк на 1 м^3, в уже заселенных домах – не более 200 Бк на 1 м^3, а если его содержание превышает 400 Бк на 1 м^3, то жильцы должны быть переселены.

2.1.4. Картографический метод исследований

Первые опыты использования карт для научного исследования относятся к рубежу XVIII–XIX вв. Они были связаны с анализом новых физико-географических карт мира. Ученые впервые стали уделять внимание изучению пространственного положения материков, океанов, вычислению их форм, средних высот и глубин, закономерностям

распределения горных систем и т. п. Картографический метод исследования способствовал открытию фундаментального закона географической зональности. Вначале А. Гумбольдт открыл климатические и растительные зоны Земного шара, а затем В. Докучаев с помощью карт доказал наличие зональности географической среды в целом. Обнаруженное А. Вегенером на картах поразительное сходство очертаний восточного берега Южной Америки и атлантического побережья Африки положило начало теории дрейфа континентов, которая до сего времени черпает немало доказательств в анализе карт.

Главное условие и предпосылка развития картографического метода исследования – наличие карт высокого качества, подробных, точных и, главное, составленных на строго научной основе. Создание таких карт явилось итогом развития всей русской и советской картографической школы. Успехи в области топографического и особенно тематического картографирования, создание карт новых типов, серий карт, комплексных научно-справочных атласов в совокупности стали основой для развития картографического метода исследования.

Другой предпосылкой служит разработка технических приемов анализа карт. Исторически сложилось так, что наибольшее развитие получили картометрические и морфометрические приемы, т. е. измерения по картам высот, глубин, длин, площадей и форм.

Принципиальная возможность использования карты в качестве средства исследования заложена в том, что она является моделью действительности. Моделями географической действительности служат географические описания, теории и гипотезы, карты, аэро- и космические снимки, таблицы, профили и диаграммы, математические и логические формулы, уравнения и символы.

Рассмотрим особенности и свойства картографической модели.

Абстрактность. Картографическая модель представляет собой научную абстракцию, полученную в результате формализации и генерализации изображаемого явления.

Часто основные достоинства карты видят в том, что она служит удобным средством систематизации накопленного полевого или лабораторного материала, протоколом наблюдения. Это верно лишь отчасти, и не в этом главное. Важнее другое – абстрактность генерализованной картографической модели, которая обладает преимуществами, незаменимыми при исследовании. Обращаясь к карте, исследователь имеет дело не просто с разрозненными или систематизированными фактическими данными, а с целостным географическим образом, с системой понятий, возникших в процессе картографирования и зафиксированных на самой карте и в ее легенде.

Избирательность. Суть этого свойства состоит в том, что картографическая модель способна раздельно изображать те факторы,

явления и процессы, которые в реальных условиях действуют совместно. Вообще говоря, любая карта показывает явления избирательно, ибо не существует карт, характеризующих всю природу в целом, но в наибольшей степени этим свойством обладают карты аналитические. С помощью серии таких карт можно расчленить взаимосвязи, «разложить по полочкам» и подвергнуть анализу самые сложные явления.

Синтетичность картографической модели, напротив, обеспечивает целостное изображение явлений и процессов, которые в реальных условиях проявляются изолированно. Картографический синтез связан с введением новых обобщающих понятий, показателей условных обозначений, с разработкой синтетических легенд.

Масштаб и метричность. Масштаб – наиболее известное свойство карты, которое обеспечивается математическим законом проекции, точностью создания и воспроизведения карты.

Однозначность изображения также вытекает из математического закона построения карты. Это свойство следует понимать шире, чем простое взаимно-однозначное соответствие точек на карте и на земной поверхности. Всякий знак, любая точка или линия на карте имеет лишь один зафиксированный в легенде смысл. Для сравнения напомним, что аэрофотоизображение допускает разные толкования одних и тех же объектов, например, прямая линия на снимке до выполнения специального дешифрирования может трактоваться как тектоническая трещина, эрозионная ложбина, канава.

Непрерывность изображения. Карта «не терпит пустоты», в этом отношении она отличается от многих других географических моделей. Для ее создания необходимо располагать данными по всей территории. Непрерывность картографического изображения является большим достоинством лишь в случае хорошей изученности территории. При недостаточной или неравномерной изученности это свойство карты может стать недостатком, о чем будет сказано ниже.

Наглядность. Данное свойство есть прямое следствие образного характера картографической модели. Оно позволяет охватить явление во всей его целостности и сложности, со всеми закономерными и случайными деталями.

Обзорность. Это, по-видимому, самое специфическое свойство карты, позволяющее охватить единым взглядом и исследовать сколь угодно обширные пространства. Именно этому свойству карты география и геология обязаны открытием многих закономерностей регионального и планетарного масштабов. Даже снимки, сделанные из космоса, уступают ей в этом отношении; их обзорность меньше из-за присутствия множества посторонних и второстепенных деталей, т. е. из-за недостаточной избирательности изображения.

Геометрическое подобие означает соответствие форм и размеров картографического изображения и картографируемого явления или процесса и обеспечивает точность измерений по карте в пределах возможностей данного масштаба. Благодаря этому свойству получают представление о взаимном положении, территориальном соподчинении, конфигурации и величине исследуемого явления, т. е. о его пространственной структуре.

Географическое соответствие – одно из важнейших свойств, которое подразумевает научно обоснованное изображение явлений и взаимосвязей, их главных типичных особенностей с учетом генезиса и внутренней структуры. Критерии, обеспечивающие географическое соответствие карты, определяются уровнем географической изученности явления, полнотой и достоверностью исходной информации, правильными научно-методическими принципами составления карты, удачной и обоснованной генерализацией.

Логичность легенды. Это свойство, строго говоря, не относится к самому картографическому изображению, но легенда неотрывна от карты, служит ключом к ней и ее логической основой. Недаром составление карты всегда начинается с разработки легенды. Легенда карты не только поясняет условные знаки, она содержит таксономические обозначения.

При всех достоинствах картографических моделей нельзя игнорировать их недостатки. Главным из них остается формализм карты, приводящий к тому, что явления, имеющие разную природу, могут получить одинаковую картографическую интерпретацию. Единственным способом преодоления этого недостатка при пользовании картой является комплексирование картографического метода исследования с методами, раскрывающими генезис явления.

У карты есть и другие, специфические, «картографические» недостатки. Выше уже отмечалось, что, давая непрерывное изображение явления на всей территории, карта часто затушевывает, скрывает различия в изученности, в обеспеченности фактическими данными.

Известно также, что на одной карте трудно совместить несколько явлений, например, рельеф, почвы и растительность нельзя показать одновременно.

2.1.5. Методы социальной экологии

Социальная экология является новым научным направлением на стыке социологии, экологии, философии, науки, техники и других отраслей культуры, с каждой из которых она очень тесно соприкасается. В настоящее время можно говорить о трех направлениях социальной экологии.

Первое направление – исследование взаимоотношений общества с природной средой на глобальном уровне, в масштабе планеты, иными

словами, взаимоотношение человечества в целом с биосферой Земли. Конкретно-научной основой исследований в данной области служит учение В. Вернадского о биосфере. Такое направление можно назвать глобальной экологией. Для него актуальны методы оценки количества ресурсов нашей планеты, глобальных показателей загрязнения природной среды, глобальных круговоротов химических элементов в их взаимодействии, влияния космоса на Землю, состояния озонового щита в атмосфере, функционирования Земли как единого целого и т. п.

Второе направление – исследования с точки зрения понимания человека как общественного существа. Отношения человека к социальному и природному окружению коррелируют между собой. Чтобы отделить данное направление, изучающее отношение различных социальных групп и классов к природной среде и структуру их взаимоотношений, детерминированных отношением к природной среде, от предмета глобальной экологии, можно называть его социальной экологией в узком смысле. В этом случае социальная экология, в отличие от глобальной экологии, оказывается ближе к гуманитарным наукам.

Третьим научным направлением можно считать экологию человека. Ее предметом является система взаимоотношений с природной средой человека как индивида. Данное направление ближе к медицине, чем социальная и глобальная экология. Задача экологии человека – разработка прогнозов возможных изменений в характеристиках здоровья человека (популяции) под влиянием изменений внешней среды.

Поскольку социальная экология является переходной наукой между естественными и гуманитарными, постольку в своей методологии она должна использовать методы и естественных, и гуманитарных наук, а также те методологии, которые представляют собой единство естественнонаучного и гуманитарного подходов.

В социальной экологии используются методы наблюдений и моделирования.

Социальная экология затрагивает вопросы демографического поведения, которое включает:

- брачное и репродуктивное поведение;
- миграционное поведение;
- самосохранительное поведение (отношение к своему здоровью).

Брачное и репродуктивное поведение оценивается по следующим показателям:

- доля лиц в каждом поколении, когда-либо вступавшая в брак;
- возраст вступления в брак;
- доля лиц, вступивших в повторный брак после развода или овдовения;
- интервал времени между разводом (овдовением) и повторным браком;

• коэффициенты брачности (показывают интенсивность вступления в брак в определенном возрасте или в целом для всех возрастов).

Что касается миграционного поведения, то наиболее часто переселяются молодые люди до 30 лет, не имеющие детей. Миграции зависят от социальных условий жизни, от наличия рабочих мест. Различают миграции между регионами, странами и миграции из села в город.

Самосохранительное поведение связано с отношением к своему здоровью. Здоровье – это состояние полного физического, психического и социального благополучия, а не просто отсутствие заболеваний или недомоганий. Основными статистическими показателями интегрального здоровья населения являются:

• смертность (общая, в определенном возрасте, младенческая, трудоспособного населения, стандартизованная смертность по определенным причинам (онкология, курение, сердечные заболевания, несчастные случаи на производстве, на транспорте и т. д.));

• ожидаемая продолжительность жизни;

• рождаемость на 1000 жителей (чел/год).

Существуют специфические методы диагностики заболеваний (исследований): рентгеновское и ультразвуковое исследования, анализ мочи, анализ крови (сахар, гемоглобин, скорость оседания эритроцитов), метод «случай-контроль», когда врачи контролируют результаты воздействия какого-либо фактора (радиоактивное излучение, случайная передозировка лекарств, содержание токсического вещества в питьевой воде определенного региона и др.) на человека. При этом основным источником информации являются сведения медицинской статистики.

Список литературы

1. *Берлянт, А. М.* Картографический метод исследования / А. М. Берлянт. – М., 1978. – 225 с.

2. География и мониторинг биоразнообразия / Н. В. Лебедева [и др.]. – М.: Изд-во Науч. и учеб.-метод. центра, 2002. – 432 с.

3. *Гершензон, В. Е.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания: учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / В. Е. Гершензон, Е. В. Смирнова, В. В. Элиас; под ред. В. Е. Гершензона. – М.: Академия, 2003. – 288 с.

4. *Денисова, С. И.* Полевая практика по экологии / С. И. Денисова. – Минск: Універсітэцкае, 1999. – 120 с.

5. *Дорохова, Е. Н.* Аналитическая химия. Физико-химические методы анализа / Е. Н. Дорохова, Г. В. Прохорова. – М.: Высш. шк., 1991. – 255 с.

6. *Кауричев, И. С.* Теория и практика метода сорбционных лизиметров в экологических исследованиях: учебное пособие / И. С. Кауричев, И. М. Яшин, В. А. Черников; Моск. с.-х. акад. им. К. А. Тимирязева, Учеб.-метод. об-ние каф. почвоведения и экологии. – М.: Изд-во МСХА, 1996. – 142 с.

7. *Реймерс, Н. Ф.* Природопользование: словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М.: Мысль, 1990. – 639 с.

8. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии: учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2000. – 396 с.

9. Роль и методы социальной экологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://biofile.ru/geo/14061.html. – Дата доступа: 15.05.2017.

10. Экология крупного города (на примере Москвы): учебное пособие / под общ. ред. А. А. Минина. – М., 2001.

11. Руководство по лабораторным животным и альтернативным моделям в биомедицинских технологиях / под ред. Н. Н. Каркищенко и С. В. Грачева. – М.: Профиль, 2010. – 344 с.

12. *Жарикова, Г. А.* Оценка интегральной токсичности почв биотестированием на дождевых червях / Г. А. Жарикова. – Режим доступа: http://www.greenpik.ru/sections/98.html&article=19.

2.2. Методы изучения роста и развития лесных сообществ

2.2.1. Методы изучения биологической продуктивности древесного яруса, полога подроста и подлеска

Создание и отмирание органической массы в растительных сообществах протекает с различной интенсивностью во времени. Скорость продукционного процесса зависит от фазы вегетационного периода, погодных условий, давности последнего значительного нарушения (рубки, пожара, ветровала и др.), а также от наличия хронических антропогенных воздействий (атмосферного загрязнения, рекреации и др.). Это определяет необходимость динамического подхода к изучению биологической продуктивности растительных сообществ.

Ниже представлен комплекс методов учета органической массы древесного яруса, полога подроста и подлеска, который применялся Е. Н. Андреевой с соавторами при исследовании состояния и динамики европейских бореальных сосновых лесов [2].

Выбор пробных площадей. Для учета фитомассы и динамики органического вещества древесного яруса лесных биоценозов в каждом изучаемом типе леса следует закладывать серию постоянных пробных площадей, охватывающих, по возможности, сообщества с древостоями разных классов возраста (т. е. сообщества с разной давностью последнего катастрофического нарушения). В каждом классе возраста желательно иметь не менее двух пробных площадей. Одна предназначается для проведения статистических учетов, другая – для дальнейших наблюдений (мониторинга). Особенно важно охарактеризовать первые три-четыре класса возраста древостоя (20–80 лет), так как в течение этого периода происходит наиболее существенное изменение величины фитомассы и годичной продукции эдификаторного яруса. В соответствии

со временем восстановления основных параметров древесного яруса после полного разрушения контрольные значения запаса фитомассы древостоя для соответствующего типа леса могут быть определены в сообществах с давностью последнего нарушения около 200 лет.

Для получения точных данных первостепенное значение имеет правильный подбор пробных площадей. Закладываемые пробные площади служат для выбора модельных деревьев, учета отпада растений разных ярусов лесных сообществ. Пробная площадь должна быть окружена защитной полосой шириной не менее 50 м, которая используется как рабочая зона для отбора модельных деревьев и учета фитомассы подчиненных ярусов сообществ.

Определение фитомассы древесного яруса. На каждой пробной площади производят сплошной перечет и нумерацию (масляной краской или при помощи специальных металлических пластинок) деревьев, определяют основные морфометрические параметры (диаметр, высоту, высоту прикрепления кроны) всех растущих деревьев каждой породы и отдельно – параметры сухостоя. При помощи мерной вилки измеряют диаметр с точностью до 1 см на высоте 1,3 м от корневой шейки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В древостоях первых двух классов возраста измерения проводятся начиная со ступени толщины 2 см с интервалами через 1 см, третьего класса возраста и выше – начиная со ступени толщины 6 см с интервалом 2 см, а при менее детальных исследованиях – 4 см. Деревья, имеющие в формуле <5 %, в дальнейшем в расчет не принимаются.

Одновременно с перечетом производят измерение высоты деревьев и высоты прикрепления кроны (высоты прикрепления первой живой ветви) с помощью высотомера (точность замеров – 0,1 м); для каждой ступени толщины выполняется по три замера. На основе этих данных строится график зависимости высот деревьев от их диаметров (кривая высот). Далее по вычисленному среднему диаметру и кривой высот находят среднюю высоту деревьев и среднюю высоту прикрепления кроны для господствующей части древостоя и для подчиненного компонента (для каждой породы отдельно).

Выбранные по этим показателям (среднему диаметру, средней высоте и средней высоте прикрепления кроны) модельные деревья служат основой для учета фитомассы древостоя на пробной площади. Для господствующего и подчиненного компонентов каждой породы берется по два-три модельных дерева. Чтобы не нарушать пробную площадь, модельные деревья следует выбрать на территории окружающей ее рабочей зоны. Не рекомендуется брать модельные деревья с края выделов.

Сроки взятия модельных деревьев определяются временем завершения формирования прироста текущего года. Обычно это середина ав-

густа и даже начало сентября, однако в различных зонах и районах эти сроки могут изменяться.

Модельные деревья спиливают у самого основания, измеряют их длину, а возраст определяют по числу годичных колец. Со ствола обрубают все ветви, разделяют их на живые и отмершие и складывают на брезент. Крону при этом желательно разделить на три равные части и ветви каждой трети сложить отдельно.

Определение массы ствола. Из ствола выпиливают по два кружка на высоте 1; 1,3; 3; 5 м и т. д. через каждые два метра вплоть до вершины. В дальнейшем одна серия кружков служит для изучения хода роста, вторая – для определения химического состава и влажности. Не следует брать пробы на анализ во время дождя, а также в первые три-четыре дня после дождя.

Анализ хода роста проводят на невысушенных спилах во избежание их деформации. Распиленный на указанные выше отрезки ствол взвешивают и к полученной массе прибавляют массу кружков.

Определение массы листьев (хвои) и ветвей деревьев. Из каждой трети кроны молодых деревьев (до 60 лет) отбирается по 1 средней по размеру ветви из каждой мутовки для последующего отделения листьев или хвои и других учетов. У деревьев старше 60 лет отбирают по 1–2 ветви из каждой трети кроны. Отобранные средние ветви немедленно взвешивают. После этого с них удаляют листья (хвою) и взвешивают снова. Таким образом определяют сырую массу каждой из модельных ветвей. Иногда средние ветви, очищенные от листьев (хвои), сортируют на две группы: мелкие ветви (<1 см в диаметре) и крупные ветви. Затем ветви взвешивают отдельно по указанным группам, а после этого измельчают. Крупные ветви распиливают на отрезки по 10–15 см. Из каждой группы берут средние пробы (0,5–1,0 кг) для химического анализа и определения влажности.

Сухие ветви учитываются отдельно, из них также берется средняя проба для определения влажности и для химического анализа.

По разности массы облиственных (охвоенных) и безлистных ветвей определяют общую массу листьев (хвои) на модельной ветви. Этот способ предпочтительнее, чем непосредственное взвешивание листьев (хвои), которые за время работы по обрыванию теряют много влаги. Зная общее число ветвей в соответствующей мутовке или в соответствующей трети кроны, определяют общую сырую массу ветвей (или сырую массу крупных и мелких ветвей) и хвои для всего модельного дерева. Масса побегов и хвои текущего года учитывается отдельно. С этой целью с модельных ветвей отделяются приросты текущего года и взвешиваются с хвоей и без хвои. Зная общее количество ветвей на дереве, путем расчета получают сырую массу побегов и хвои текущего года для всего дерева.

Листья (хвою) рассыпают на брезенте и берут из них средние пробы (0,5 кг) для химического анализа и определения влажности (для хвои текущего года отдельно). Для определения влажности рекомендуется сушить среднюю пробу листьев (хвои) целиком.

Определение площади поверхности листьев (хвои). Для определения площади поверхности листьев из разных частей кроны каждого модельного дерева соответствующей породы собирают в пачки по 50–100 штук черешками в разные стороны (10–20-кратная повторность). С помощью остро заточенной цилиндрической высечки (удобны специальные высечки для пыжей) вырубается столбик на всю толщину пачки (из крупных листовых пластинок можно высечь 2–3 образца). Высечки из каждой пачки помещаются в бюксы и взвешиваются в сыром виде и после высушивания до абсолютно сухого состояния. Зная число высеченных кружков, площадь одного кружка, среднюю массу, можно вычислить площадь листьев, приходящуюся в среднем на единицу их массы. Далее, имея данные об общей массе листьев данной породы на пробной площади, можно рассчитать площадь их поверхности на единицу площади растительного сообщества (листовой индекс).

Определение площади поверхности хвои можно проводить различными методами (например, по методу, описанному в [1]). Из разных частей кроны модельных деревьев отбирается не менее 100 хвоинок, у каждой из которых определяется длина. Далее у 30–50 хвоинок определяется величина периметра на поперечном срезе под микроскопом с малым увеличением. Периметр рассчитывается как средний из трех измерений, выполненных в середине и с разных концов хвоинки. После соответствующих измерений вычисляется площадь поверхности хвоинки путем перемножения средней длины и периметра. Далее следует установить корреляцию между площадью поверхности и массой хвоинок. Для этого берут навески хвои от 0,2 до 1–2 г и подсчитывают число хвоинок в навеске. Зная площадь поверхности хвоинки, рассчитывают площадь поверхности, приходящуюся на единицу массы. Затем полученную величину пересчитывают на массу хвои модельного дерева и массу хвои древостоя на 1 га.

Определение массы генеративных органов. Для учета генеративных органов могут быть использованы те же ветви, которые были взяты для определения количества листьев или хвои. При стационарных исследованиях учет должен производиться дважды: во время цветения (или формирования мужских и женских стробилов у хвойных) и в период созревания плодов и семян (у хвойных учитываются двухлетние женские шишки).

На модельных ветвях определяется число генеративных органов (у хвойных раздельно учитываются женские шишки текущего года

и предшествующих лет). При взвешивании собранных с ветвей шишек (или плодов у лиственных пород) берутся образцы на влажность.

Определение фитомассы подроста и подлеска. Для определения фитомассы производят перечет растений подроста и подлеска (кустарникового яруса) с определением средней высоты растений. Учет можно производить на площадках размером 1 м^2 (1×1 м), 4 м^2 (2×2 м) или на профилях шириной 2 м, регулярно расположенных на территории пробной площади.

Затем для каждого из основных видов, формирующих полог подроста и подлесок, выбирают средние по высоте и развитию экземпляры (по 10 штук), которые срезают под корень. У срезанных экземпляров определяют массу ствола, ветвей (с выделением побегов текущего года), листвы (хвои с разделением на хвою текущего года и старших возрастов), берут образцы для химического анализа и определения содержания влаги. Найденные величины пересчитывают на число экземпляров данной породы на площади 1 га. Затем определяют общую фитомассу всех видов подроста и подлеска для данного типа леса при данной давности последнего нарушения.

Определение фитомассы подземных органов. Учет корней растений древесного яруса, полога, подроста и подлеска. У каждого спиленного модельного дерева господствующего яруса выделяют площадку для сбора и учета корней. Размер площадки устанавливают исходя из средней площади питания одного дерева, которую определяют путем деления величины пробной площади (в м^2) на число растущих на ней деревьев господствующего компонента древесного яруса. Затем площадки найденного размера закладывают вокруг модельных деревьев каждой породы, относящихся к господствующему компоненту древостоя, таким образом, чтобы модельное дерево находилось в центре.

Для сбора корней по наружной стороне площадки копают траншею шириной около 0,5 м и глубиной в зависимости от строения корневой системы (1,0–1,5 м или больше). Почву из траншеи откидывают на наружную сторону на подстеленный брезент. Затем поверхность площадки очищают от растений травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. Далее на разостланный брезент снимают слой лесной подстилки, последовательно один за другим минеральные горизонты почвы и выбирают корни деревьев, растений подлеска и кустарничков. В месте прохождения стержневого корня или глубоко идущих якорных корней производят дополнительное углубление, чтобы полностью извлечь все глубоко проникающие корни. Обычно корни учитывают до глубины 1,5–2 м. Учет корней в более глубоких горизонтах почвы представляется очень сложной задачей, которую, однако, следует решать в тех случаях, когда количество корней, проникающих на большую глубину, значительно. Живые и мертвые корни учитываются

раздельно. Полуразложившиеся остатки корней учитывают вместе с мертвыми корнями.

Корни, собранные на брезент, отряхивают от частиц почвы и промывают водой. Корни диаметром <10 мм промывают на ситах (верхнее – с ячейками 3 мм, нижнее – 0,25 мм). Извлеченную почву после выбора из нее корней тщательно перемешивают и определяют ее объем, используя, например, ведро. Затем берут одно ведро почвы и отмывают оставшиеся мелкие корни на сите с ячейками 0,25 мм. Полученную массу корней пересчитывают на объем всей почвы и прибавляют к массе корней, непосредственно выбранных из почвы. Сначала извлечение корней производят из половины площадки. Это делается для зарисовки схемы распределения корней по генетическим горизонтам. Для этого на стенку траншеи, проходящей через середину площадки, в центре которой находится модельное дерево, накладывают металлическую сетку с квадратными ячейками размером 10×10 см, после чего на миллиметровой бумаге фиксируют распределение корней. Затем приступают к выбору корней из второй половины площадки.

После сбора всех корней из ямы извлекают комель. Его тщательно очищают от приставшей почвы (в необходимых случаях обмывают), взвешивают и выпиливают или вырубают из него образцы для химического анализа и определения влажности.

Для химического анализа корни отбирают отдельно по видам растений и не отмывают их водой во избежание выщелачивания химических элементов. Для очистки их ополаскивают спиртом на ситах (0,25 мм). Каждый образец для анализа должен быть массой около 0,5 кг.

Второй способ (модификация метода, предложенного в [3]) состоит в следующем. Вычислив площадь питания дерева определенного возраста, нужно очертить вокруг его основания круг, соответствующий площади питания. Далее необходимо обозначить сектор, равный 1/5 площади питания, и в пределах сектора до глубины распространения основной массы корней (1–1,5 м) извлечь послойно (по генетическим горизонтам) почву с корнями. Затем из вынутой почвы отобрать все корни с разделением на живые и мертвые, а почву вновь засыпать в шурф, соблюдая последовательность генетических горизонтов. С поверхности сектор обозначить системой колышков или ограничить проволокой. На одной из таких площадок через два года (на другой – через три и т. д.) вновь произвести раскопку и определить массу живых и отмерших корней. Получив данные по массе прироста корней (а также их отмирания) за 2, 3, 4, 5 и т. д. лет для деревьев разных классов возраста, можно выявить закономерности роста и отмирания корневых систем деревьев.

2.2.2. Методы изучения биологической продуктивности нижних ярусов лесных сообществ

Лесные сообщества являются многокомпонентными системами, которые характеризуются сложной вертикальной и горизонтальной структурой. В составе травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов лесных сообществ наблюдается большое разнообразие жизненных форм: кустарнички, полукустарнички, многолетние и однолетние травы, мхи и лишайники. В связи с этим изучение биологической продуктивности различных компонентов нижних ярусов требует применения разных подходов и вариантов методик.

На каждой учетной площадке проводят геоботаническое описание с определением общего проективного покрытия травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, проективного покрытия отдельных видов растений и измеряют высоту ярусов.

Травяно-кустарничковый ярус. Для определения надземной фитомассы травяно-кустарничкового яруса наиболее часто используют площадки размером 1×1 м или 0,5×0,5 м, границы которых отмечают при помощи рамки соответствующего размера. На каждой площадке срезают все особи растений (на уровне поверхности подстилки) и их части, попадающие в отграниченную рамкой площадь. Срезанные растения разбирают по видам и взвешивают. Для кустарничков раздельно определяют массу листьев и стеблей. Листья и побеги текущего года учитывают отдельно. Определение массы отмерших растений каждого вида проводят отдельно.

Учет массы подземных органов растений травяно-кустарничкового яруса производится методом монолитов. Для этого закладывают площадки размером 25×25 см, на которых проводят отмывку корней из разных почвенных горизонтов на ситах с ячейками 0,25 мм. Площадки закладывают в трехкратной повторности. Корни древесных растений при отмывке отбрасывают. Луковицы, клубни и корневища следует учитывать отдельно, не соединяя их с корнями. Если необходимо проводить химический анализ корней, то их следует собирать вручную, механически очищая от почвы, а затем ополаскивать на ситах спиртом.

Мохово-лишайниковый ярус. При определении фитомассы мохово-лишайникового яруса размер учетных площадок составляет от 0,25×0,25 м до 1×1 м и зависит от состава и структуры мохово-лишайникового покрова. Необходимое число площадок определяется исходя из характера мохового покрова и заданной точности определения.

Мхи и лишайники срезают на уровне подстилки, разбирают по видам и взвешивают. Как правило, определяют массу каждого из основных доминантных видов и суммарную массу остальных видов отдельно для мхов и лишайников. В некоторых случаях можно ограничиться опреде-

лением суммарных масс мхов и лишайников. Стебли мхов и талломы лишайников рекомендуется разделять на верхнюю (живую и растущую) и нижнюю (отмирающую и отмершую) части, которые следует взвешивать раздельно.

Определение годичной продукции. Травяно-кустарничковый ярус. Определение годичной продукции проводят после завершения роста побегов в текущем году одновременно с учетом общей фитомассы растений травяно-кустарничкового яруса на учетных площадках. С этой целью надземную фитомассу кустарничков, срезанную на учетной площадке, разбирают по видам, у каждого растения разделяют однолетнюю (текущего года) и многолетнюю части. Годичную продукцию составляют побеги текущего года с листьями. У кустарничков граница побега текущего года определяется по морфологическому признаку: круговому рубцу в месте прикрепления чешуи верхней боковой почки, дающей начало побегу текущего года. Дополнительным признаком может служить наличие у основания побега текущего года концевой части прироста предшествующего года (например, у черники).

Величина годичной продукции может быть выражена в единицах массы в сыром и (или) абсолютно сухом состоянии на единицу площади, обычно 1 м^2. Побеги текущего года с листьями каждого вида, собранные с каждой учетной площадки, взвешивают в сыром виде. Для определения абсолютно сухой массы пробы высушивают в сушильном шкафу при температуре 105 °С и снова взвешивают. Зная сырую и абсолютно сухую массу проб, рассчитывают среднюю величину годичной продукции каждого вида кустарничков на единицу площади в изучаемом фитоценозе.

Годичная продукция травянистых растений принимается равной запасу фитомассы надземных органов.

Мохово-лишайниковый ярус. Для определения величины годичной продукции мхов необходимо знать среднее число побегов на единицу площади, массу отрезка побега длиной 1 см и величину годичного линейного прироста побегов каждого вида. При учете общей фитомассы мхов отбирают средние пробы побегов каждого вида и определяют их сырую массу. В лабораторных условиях в пробе подсчитывают количество стеблей определенного вида и от каждого побега отделяют верхнюю часть длиной 1 см. Пробы высушивают до абсолютно сухой массы при температуре 105 °С. Таким образом, для каждого вида определяют массу отрезков побегов длиной 1 см и общую массу пробы в абсолютно сухом состоянии, а также рассчитывают число стеблей на единицу массы. Соотношение данных сырой и абсолютно сухой массы пробы позволяет оценить содержание влаги в ней.

Для определения линейного годичного прироста мхов разработаны различные методы. Выбор метода обусловлен сроками исследования

и анатомо-морфологическими особенностями мхов. Следует отметить, что величина годичного линейного прироста мхов существенно варьирует в пределах синузий, поэтому для более точной оценки роста особей необходимо брать образцы как из центральной, так и из периферической зон синузий.

Метод перевязок. Метод перевязок заключается в перевязывании стеблей мхов белой ниткой на конце побега или на 10–20 мм ниже верхушек стеблей, или на нижней границе ассимилирующей (зеленой) части побега. Последнее позволяет учитывать не только прирост, но и отмершую за сезон часть стебля. Обычно перевязывают от 20–40 до 50–100 стеблей. Для перевязки стеблей можно использовать капроновую или другую синтетическую нитку, концы которой закрепляют на леске, натянутой между двумя колышками.

Метод имеет ряд недостатков, так как во время перевязки стеблей может быть повреждена верхушка побега или нарушена естественная сомкнутость моховой дерновинки (особенно у видов, имеющих жизненную форму с высокой плотностью дерновинки), что приводит к остановке роста главного побега и формированию латеральных побегов. Небольшая синузия при изучении динамики роста с использованием этого метода может быть полностью уничтожена или необратимо повреждена. При проведении многолетних наблюдений на одних и тех же площадках неизбежно происходит небольшое смещение перевязок с одних стеблей на другие, поэтому метод перевязок можно использовать только при изучении достаточно больших по площади однородных участков синузий мхов с ортотропным ростом. Кроме того, этот метод нельзя использовать при изучении ритма прироста мхов в течение вегетационного периода.

Метод окрашивания. Метод окрашивания сходен с методом перевязок и заключается в окрашивании стебля на определенном расстоянии от верхушки мха (обычно 10 или 20 мм). При помощи тонкой стальной проволоки наносится точка красной нитрокраской, которая сохраняется на стебле не менее двух лет. Для определения прироста стебля через определенный период времени измеряется расстояние между верхушкой и намеченной точкой. Метод окрашивания менее трудоемок, более точен и при его использовании меньше повреждаются верхушки стеблей. Метод окрашивания чаще используют для измерений прироста водных и полуводных мхов.

Метод отметки положения кончика стебля на субстрате. При использовании этого метода фиксируется положение кончика растущего стебля: у эпилитных видов – несмывающейся краской, у эпифитных и эпиксильных видов – зарубками на древесине или вбитыми небольшими гвоздиками или булавками. Изменение положения конца стебелька за год относительно сделанной отметки покажет величину годичного при-

роста. Этот метод наиболее пригоден для измерения прироста у мхов и печеночников с плагиотропным ростом.

Метод реперов. Измерения линейного прироста проводят на трансектах (линиях), проходящих через участки болота с различными растительными сообществами. На каждом выбранном участке на расстоянии 10 см один от другого устанавливают 20 реперов. Репер представляет собой коленчатую проволоку высотой 20 см с находящимся посередине коленом длиной 2 см. Колено (горизонтальная часть колышка) устанавливают вровень с верхушкой мха.

Замеры прироста (в мм) проводят ежемесячно в течение всего вегетационного периода. При невозможности проводить постоянные наблюдения число измерений прироста можно сократить до трех (весной, летом и в конце осени). Следует помнить, что длительность периода вегетации мхов зависит от среднесуточной температуры воздуха в конкретные годы, например, сфагновые мхи начинают развитие уже при температуре +4 °С.

Морфологический метод. Для использования этого метода необходимо иметь практический навык анатомо-морфологического анализа побегов у представителей различных таксономических групп мхов. Существуют виды с четкой морфологической границей годичных побегов. Например, для *Hylocomium splendens* характерно симподиальное ветвление, когда рост верхушки главной оси сильно отстает, а ее место занимает боковая ветвь, растущая в направлении главной оси; ежегодное образование нового этажа происходит в верхней части прошлогоднего побега. У некоторых видов листостебельных мхов и печеночников годичные побеги можно различать по величине и форме листьев, развивающихся в различное время вегетационного периода.

Методика определения линейного годичного прироста лишайников разработана слабо, и оценка этой величины может быть выполнена лишь с определенной степенью приближения. Для установления годичного линейного прироста кустистых лишайников, у которых в верхней части каждого подеция ежегодно образуется только одно новое ветвление, используется морфологический метод. Возраст живой части подеция и всей его сохранившейся части, включая отмершую, но еще не разложившуюся, может быть определен по числу основных ветвлений (или колен, заключенных между ними). Величина среднего ежегодного линейного прироста каждого подеция кустистых лишайников рода *Cladma* может быть оценена путем деления длины живой части главной оси подеция на число составляющих ее колен.

Линейный годичный прирост как кустистых, так и других форм лишайников оценивают методом повторных измерений. Для определения прироста кустистых или бокальчатых форм лишайников проводят перевязку подециев ниткой на некотором расстоянии от верхушки (0,5–1 см).

Нитка должна закрепляться на подеции, находящемся во влажном состоянии, и располагаться в месте разветвления подеция для того, чтобы она не смещалась. Учитывая наличие интеркалярного роста, следует закреплять не одну, а две-три нити на каждом подеции. У одной из ниток оставляют длинные концы, к которым прикрепляют заметную бирку с номером экземпляра.

2.2.3. Методы изучения ценопопуляций растений

В последние годы при проведении экологического мониторинга стали широко использовать популяционный подход, который заключается в изучении ценопопуляций отдельных видов растений, составляющих растительное сообщество. Ценопопуляционный анализ позволяет наиболее полно выявить специфичность реагирования растений на различные экологические факторы как на уровне отдельных особей, так и на уровне популяций.

Ценопопуляция – это совокупность особей одного вида в пределах однородного экотопа. В связи с тем, что однородный экотоп занят одним фитоценозом, границы ценопопуляции совпадают с границами фитоценоза.

В ценопопуляционных исследованиях используется много признаков, характеризующих ценопопуляцию. Наиболее важными и реактивными из них являются плотность (количество особей на единице площади), и гетерогенность (наличие в составе ценопопуляции особей, различающихся по возрасту и жизненности (виталитету)). Именно эти признаки наиболее полно отражают связь ценопопуляции растений с экологическими факторами. Для оценки их варьирования в пределах контуров ценопопуляции используют комплексно-статистический подход.

Выбор счетной единицы. Изучение ценопопуляции растений требует анализа образующих их особей, и для растений ряда биоморф очень важен вопрос выбора счетной единицы. Этот вопрос относительно легко решается, если особи растений генеративного происхождения, т. е. формируются из семян, и четко отграничены друг от друга. У растений, возникающих в процессе вегетативного размножения, за особь принимается система парциальных кустов, связанная между собой подземными органами. В таких случаях за счетную единицу принято брать отдельный парциальный куст. Существует немалое число видов, у которых первичная особь со временем распадается на вторичные особи. Учет численности этих видов можно проводить двумя способами:

- учитывать только первичные особи;
- считать каждую особь, в том числе вторичную.

Любая особь растений характеризуется определенным набором качественных и количественных признаков, которые выступают как па-

раметры ее морфологического статуса. Количественные признаки используют при исследовании онтогенетических адаптаций, при оценке жизненного состояния и построении виталитетных спектров.

Возрастное состояние – это совокупность возрастных признаков, характеризующих этап онтогенетического развития особи. Онтогенез особи – это генетически обусловленная последовательность всех этапов ее развития: от возникновения до старения и отмирания.

Возрастной состав ценопопуляции. Распределение особей в ценопопуляции по возрастным состояниям называется возрастным спектром или спектром возрастных состояний. Спектр может быть выражен в абсолютных числах или процентах от общего числа особей и представлен в виде таблицы, гистограммы или графика.

По соотношению разных возрастных групп растений различают три типа ценопопуляции: инвазионную, нормальную и регрессивную, – которые характеризуют позицию и жизненность вида в среде исследуемого фитоценоза.

Инвазионная ценопопуляция не способна к самоподдержанию и зависит от внесения зачатков извне. Она состоит преимущественно из молодых (виргинильных) особей:

- только из семян, занесенных извне;
- из семян и проростков;
- из семян, проростков, имматурных и виргинильных растений.

Гистограмма возрастного спектра таких популяций обычно имеет левостороннюю асимметрию.

Нормальная ценопопуляция способна к самоподдержанию семенным или вегетативным путем либо тем и другим одновременно. В возрастном спектре таких ценопопуляций содержатся особи всех возрастных состояний (ценопопуляция нормальная, полночленная) или особи какого-либо возрастного состояния отсутствуют (ценопопуляция нормальная, неполночленная). Неполночленность ценопопуляции может быть следствием влияния экзогенных (внешних по отношению к ценопопуляции) и эндогенных (биологических свойств вида) факторов.

Регрессивная ценопопуляция имеет повышенную долю субсенильных и сенильных растений при почти полном отсутствии виргинильных особей и не способна к самоподдержанию, недолговечна и со временем полностью выпадает из сообщества. В гистограммах возрастных спектров таких популяций отмечается правосторонняя асимметрия.

Различные стрессовые воздействия, например, атмосферное промышленное загрязнение, на ценопоцуляции вполне четко проявляются в характере возрастных спектров. Они становятся неполночленными и/или правосторонними.

2.2.4. Диагностические признаки жизненного состояния деревьев в условиях атмосферного загрязнения

Воздействие атмосферного загрязнения на растение – сложное биохимическое явление, затрагивающее в первую очередь метаболические и физиологические процессы и разрушающее ультраструктуру клеток листа. По мере разрушения внутриклеточных структур начинают проявляться внешние, визуально наблюдаемые повреждения и отклонения от нормы у ассимиляционных органов и других частей растений. Степень воздействия загрязнителя на растение зависит не только от его концентрации и продолжительности действия, но и от видовой принадлежности и толерантности растений к загрязнителю, от стадии онтогенеза, сезона года и состояния окружающей среды (температуры, влажности воздуха и почвы, условий освещенности, ветра, условий минерального питания и пр.).

В процессе многолетних исследований жизненного состояния лесных фитоценозов были выявлены следующие диагностические признаки повреждения деревьев промышленным загрязнением:

1) хлорозы и некрозы ассимиляционных органов;

2) снижение продолжительности жизни хвои;

3) снижение охвоенности крон с нарушением распределения фитомассы хвои по высоте крон;

4) ускоренное отмирание ветвей основной кроны, снижение линейного прироста оси ствола и ветвей;

5) ослабление побегообразования вследствие отмирания ветвей основной кроны с одновременным усилением образования короткоживущих побегов из спящих почек;

6) снижение радиального прироста древесины ствола и скелетных ветвей;

7) изменение габитуса молодых деревьев, превращение их в кустообразную или псевдостланиковую форму;

8) гибель деревьев с полной деградацией древостоя.

Для целей полевой индикации загрязнения и оценки жизненного состояния деревьев наиболее часто используют первые пять признаков.

Поскольку различия в химическом составе загрязнителей, их концентрации, длительности разовых, эпизодических, систематических или постоянных воздействий вызывают неодинаковые ответные реакции растений, при этом их внешнее отображение часто неспецифично (или недостаточно специфично), без специальных химических анализов не всегда возможно отличить влияние одного загрязнителя от другого. Кроме того, атмосферные выбросы промышленных предприятий представляют собой, как правило, сложные смеси различных по химическому составу газов и твердых частиц. Их совместное действие на растение бывает синергическим (взаимно усиливающим), просто суммарным

или антагонистическим, а симптомы повреждения листьев несколько отличаются от симптомов влияния главного загрязняющего агента, действующего в одиночку. Все это предопределило описание повреждений листьев не для одиночных загрязнителей, а для их смесей, типичных для тех или иных промышленных предприятий.

2.2.5. Диагностические признаки повреждения ассимиляционных органов деревьев при воздействии различных типов загрязнения

Основным диагностическим признаком повреждения ассимиляционных органов растений атмосферным загрязнением является наличие хлорозов и некрозов на хвое или листьях. Однако этот признак недостаточно специфичен, поскольку хлорозы и некрозы могут возникать в результате действия других факторов: недостатка или избытка питательных веществ почвы, высоких и низких температур, засухи, подтопления корневых систем, а также в результате деятельности вредителей и различных патогенов. Для выявления воздействия фактора атмосферного загрязнения необходимо проводить обследование участков леса на разном удалении от источника загрязнения.

Далее рассмотрим диагностические признаки повреждений ассимиляционных органов растений наиболее распространенных источников загрязнения: металлургических комбинатов, предприятий по производству минеральных удобрений и тепловых электростанций, работающих на угле.

На медно-никелевых комбинатах основными загрязнителями являются диоксид серы и тяжелые металлы (Ni, Cu, Co).

Возрастная чувствительность листьев. Наименьшей чувствительностью обладают растущие хвоя и листья, наибольшей – полностью закончившие рост. Старая хвоя имеет промежуточную чувствительность, однако из-за усиливающихся с возрастом нарушений в структуре кутикулы и покрывающих ее волосков происходит зимнее и ранневесеннее иссушение хвоинок, и они преждевременно опадают. Более сильные повреждения хвои прежних лет связаны также с большей длительностью воздействия на нее загрязнителей.

Характер повреждений хвои и листьев. У хвои сосен и елей хлорозы желтоватого, желтого и оранжевого цвета в виде точек, поясков, пятен и сплошных участков, охватывающих обычно верхнюю часть хвоинок. Некрозы белесоватого, коричневого или бурого цвета появляются сначала на кончиках хвоинок и распространяются к основанию. У сосен могут наблюдаться деформация и неравномерный рост хвоинок. Лиственницы более устойчивы к хроническому загрязнению, но весьма чувствительны к высоким концентрациям выбросов. Хлоро-

зы, переходящие в некрозы, возникают менее чем через сутки после аварийных выбросов.

У лиственных пород хлорозы желтого, кофейного или красноватого цвета, межжилковые и краевые. При длительном загрязнении переходят в некрозы красно-бурого, бурого или черного цвета. Крупные жилки листьев и часть прилегающего к ним мезофилла повреждаются позже других тканей.

Подрост хвойных и лиственных пород и невысокий подлесок, защищенные пологом взрослого древостоя, повреждаются меньше, что особенно справедливо для экземпляров, находящихся зимой под снегом.

На заводах по получению алюминия основными загрязнителями являются соединения фтора, преимущественно фтористый водород, и диоксид серы.

Возрастная чувствительность листьев. Наибольшей чувствительностью обладают растущие хвоя и листья, наименьшей – закончившие рост.

Характер повреждений листьев. Типичные формы некрозов при воздействии фтора – верхушечные и краевые, т. е. места наиболее активных процессов функционирования ассимиляционных органов. У хвойных пород некроз приурочен к верхней части хвоинки и имеет буровато-красный цвет, за что получил название «ожога верхушки хвои». Повреждение может охватывать треть, половину и даже всю хвоинку. При нескольких сублетальных фумигациях некроз распространяется порциями к основанию хвоинок, причем число эпизодов загрязнения можно определить по более темным пояскам, отделяющим некротические участки друг от друга. Пораженная фтором ткань отделяется от зеленых, неповрежденных частей хвои четкой, резкой границей, иногда с грязно-зеленой каймой.

Низкие концентрации при их повторном или продолжительном действии приводят к накоплению фтора в многолетней хвое, вызывают ее повреждение и опадание. В первую очередь страдают старые и ослабленные деревья. Сосны, ели и лиственницы очень чувствительны к данному типу загрязнения.

У лиственных пород возникновению некрозов обычно предшествуют верхушечные и краевые светло-зеленые хлорозы, меняющие затем окраску на красно-коричневую, коричневую или бурую. У листьев сложной конфигурации некрозы захватывают выемки и доли листа. Расширение повреждения идет вглубь и к основанию листьев, так что впоследствии остаются нетронутыми несколько главных жилок с незначительной частью зеленого по цвету мезофилла листа. Сухие некротированные части листьев выкрашиваются, оставляя на дереве живые остатки листьев.

На предприятиях по производству минеральных удобрений основными загрязнителями являются диоксид серы, оксиды азота (в основном диоксид азота), аммиак, фтор.

Возрастная чувствительность листьев. Фтор повреждает растущие листья, диоксид серы – закончившие рост. Таким образом, повреждаются хвоя и листья различного возраста и фаз роста.

Характер повреждений листьев довольно пестрый из-за участия нескольких загрязнителей. Диоксид азота при одиночном действии – слабый токсикант, вызывающий неспецифический, порой временный хлороз. В смеси с диоксидом серы дает синергический, усиливающий повреждение эффект. При умеренных воздействиях загрязнителей хвоя старых возрастов приобретает тусклый грязно-зеленый цвет, при повторных эпизодах желтеет и преждевременно опадает. При выбросах высокой концентрации на старой хвое и листьях возникают хлорозы, тогда как на молодых наблюдаются некрозы оранжевого, красно-коричневого или бурого цвета. Хлорозы и некрозы краевые, верхушечные, межжилковые. На хвоинках наблюдаются точечные повреждения, пятна, темноокрашенные пояски. Характерна частичная или полная дефолиация деревьев. У лиственных пород отмечается более раннее пожелтение и опадание листьев.

Многолетние выбросы оксидов азота и аммиака вызывают изменения в почвенном содержании азота и приводят к интенсивному разрастанию нитрофильных растений.

Работающие на угле электростанции выбрасывают в основном диоксид серы, оксиды азота, кальций, калий, магний и различные микроэлементы.

Возрастная чувствительность листьев. Более чувствительны закончившие рост хвоя и листья.

Характер повреждения листьев. Точечные или пятнистые хлорозы желто-зеленого или желтого цвета, порой имеющие временный характер и исчезающие после прекращения воздействия (например, при перемене направления ветра) или благоприятного изменения погоды (например, дожди после засушливого периода).

Следует отметить, что, в отличие от синергического или аддитивного (суммарного) действия диоксида серы в совокупности с тяжелыми металлами или фтором, приводящего к полному распаду растительных сообществ и эрозии почвенного слоя, примесь частиц щелочных металлов, необходимых для питания растений (кальция, магния, калия), имеет антагонистический характер и снижает неблагоприятное для деревьев действие избыточных количеств диоксида серы.

Леса вокруг небольших по мощности, а также крупных, но работающих на низко сернистом топливе электростанций, в течение многих лет не обнаруживают признаков внешних повреждений хвойных

и лиственных пород. Угнетению и гибели подвергаются чувствительные к диоксиду серы лишайники и мхи. При хроническом загрязнении несколько сокращается продолжительность жизни хвои. Полное улавливание твердых частиц из труб электростанций приводит к созданию более жесткого воздействия оксидов серы и азота на растения. Неблагоприятные метеорологические условия усиливают действие этого довольно мягкого для древесных растений типа загрязнения.

Сопоставление рассмотренных выше сведений о специфике повреждений дает возможность убедиться, что, несмотря на некоторые отличия, атмосферные выбросы разных промышленных предприятий вызывают сходные симптомы. В ряде случаев различия в повреждениях нечетки и без дополнительных химических анализов невозможно точно установить, какой именно фитотоксикант вызвал повреждение.

Оптимальное время обследования состояния деревьев. Обследование древостоев хвойных пород с целью определения их жизненного состояния возможно в любое время года, если деревья не покрыты снегом. Наименьшее количество хвои отмечается весной перед распусканием почек, наибольшее – после завершения роста побегов и хвои. В таежной зоне в естественных условиях (фон) наблюдаются два максимума некрозов: ранней весной, при переходе от отрицательных к положительным температурам, и в конце вегетационного периода. Оптимальное время для наблюдений и проведения исследований – от второй половины июля до первой половины августа, когда закончен рост побегов и вновь образовавшаяся хвоя становится восприимчивой к воздействию большинства загрязнителей. Оценку жизненного состояния лиственных древостоев в условиях загрязнения целесообразно проводить во второй половине лета, примерно за две-три недели до появления первых признаков пожелтения фоновых (контрольных) древостоев. В первой половине вегетации, когда листья еще не закончили рост, они редко обнаруживают некротические повреждения (исключение составляют случаи очень высоких концентраций загрязнителей и воздействие фтористых соединений). Обследование деревьев в этот период может привести к неправильной, заниженной оценке воздействия промышленных выбросов на лесные сообщества.

2.2.6. Принципы и методы анализа давности и периодичности пожаров

Во время пожаров в результате воздействия высоких температур часто наблюдается частичное или полное повреждение и отмирание камбиального слоя стволов деревьев. По краям поврежденного участка происходит образование каллусной ткани, которая в процессе последу-

ющего периода жизни дерева постепенно наплывает на поврежденный участок, закрывая его полностью или частично.

В случае полного зарастания поврежденного участка его наличие может быть выявлено только на спиле. При неполном зарастании след повреждения (пожарный шрам) регистрируется при визуальном осмотре ствола.

Метод определения давности повреждений на стволах деревьев основан на том, что на участках с отмершим в результате термического воздействия или механически уничтоженным камбиальным слоем прекращается образование клеток древесины. Давность повреждения определяется как разность числа годичных слоев древесины, сформировавшихся на неповрежденном и поврежденном участках ствола.

Анализ признаков пожарного происхождения повреждений стволов деревьев. Существующая неопределенность при установлении причины возникновения повреждений стволов деревьев (температурное повреждение во время пожара или механическое повреждение непожарного происхождения) вызывает необходимость анализа дополнительных признаков.

Совпадение давности повреждения у большого числа особей. Одним из важных признаков пожарного происхождения повреждений является точное совпадение давности их возникновения у нескольких деревьев. Анализ частоты повреждений, выполненный на 260 поврежденных деревьях в условиях Кольского полуострова, показал, что на каждые 100 лет жизни дерева приходится в среднем примерно одно повреждение, т. е. вероятность повреждения дерева в течение конкретного года составляет $\approx 10^{-2}$. Вероятность случайного совпадения давности повреждения нескольких деревьев равна произведению вероятностей и для пяти деревьев составляет 10^{-10}. Таким образом, случайное совпадение повреждений у пяти деревьев является практически невероятным за время существования биосферы, которое составляет 10^9 лет.

Приведенные данные показывают, что точное совпадение давности повреждения даже у пяти деревьев всегда означает неслучайность их повреждения и позволяет с высокой вероятностью предполагать, что причиной этих повреждений является пожар.

Наличие обугленных участков на: а) прилегающей к месту повреждения части корки (при первом повреждении) или б) открытой древесине шрама (при повторном и следующих повреждениях) однозначно указывает на наличие пожара. По мнению многих исследователей, достаточно даже одного измерения (модельного дерева) для установления давности пожара при наличии обугленных участков корки или древесины вблизи поврежденной области.

В лесах Кольского полуострова участки обугленной корки сохраняются до 90 лет после пожара, при этом их относительная площадь

не превышает долей процента. Уже через 60 лет после пожара у основания деревьев относительная площадь обугленной корки составляет примерно 2 %, а в областях ствола, близких к пожарному шраму, обугленная кора практически не встречается. Поэтому наличие участков обугленной корки позволяет установить причину повреждения ствола (при первом повреждении дерева пожаром) только при небольшой давности пожара (до 40–60 лет). При значительной давности пожара обугленные участки сохраняются только на древесине шрамов от предшествующих пожаров.

Овальная (яйцевидная) или треугольная форма повреждения, при этом широкая часть расположена в основании ствола. Этот признак многие исследователи лесов на территории Северной Америки рассматривают как характерный для повреждения стволов деревьев пожарами. В европейских сосновых лесах из сосны обыкновенной форма пожарного шрама с расширением к основанию дерева регистрируется приблизительно в 50–60 % случаев, а в условиях Кольского полуострова – менее чем в 50 %. Таким образом, форма повреждения не всегда является признаком, однозначно свидетельствующим о причине возникновения повреждения. Следует отметить, что треугольная форма пожарных шрамов наблюдается обычно при большой сбежистости ствола, когда диаметр ствола у основания дерева на 30–50 % больше, чем диаметр на высоте 1,3 м.

Наличие резкого изменения радиального прироста деревьев после пожара. На примере сосновых лесов (*Pinus sylveslris*, *P. resinosa* Ait., *P. banksiana* Lamb.) европейского и американского Севера было показано, что может наблюдаться любой из вариантов изменения прироста после пожара: увеличение, уменьшение или отсутствие изменений.

Анализ факторов, вызывающих повреждения стволов деревьев в бореальных сосновых лесах, позволяет заключить, что главными признаками, которые должны использоваться при идентификации происхождения шрамов на стволах деревьев, являются: 1) наличие обугленных участков корки (при первом повреждении) и обугленных участков древесины (при втором повреждении) и 2) совпадение давности повреждения у нескольких деревьев. Отсутствие обугленных участков на открытой поверхности мертвой древесины шрамов поврежденных деревьев – признак отсутствия пожаров в течение периода с момента возникновения повреждения до момента регистрации. Это утверждение обосновано тем, что открытые участки древесины всегда обугливаются во время пожаров, так как интенсивность и продолжительность горения в непосредственной близости от стволов деревьев в 1,5–2 раза выше, чем на остальной территории из-за повышенной сухости и более значительного запаса опада и подстилки.

Причины непожарных повреждений стволов деревьев. Повреждения камбия на стволах деревьев могут быть вызваны не только пожарами, но и другими причинами: деятельностью крупных животных, единичными и групповыми ветровалами. Однако анализ встречаемости крупных животных (лосей, медведей) в лесах Севера показывает, что животные, как правило, являются причиной повреждения единичных деревьев.

Массовые ветровалы приводят к полной гибели древесного яруса на значительной территории, но вызванные падением деревьев повреждения других особей регистрируются в пределах относительно небольшой полосы, окаймляющей территорию ветровала. Падение деревьев при единичных и групповых ветровалах (ветровалы, захватывающие менее 3 % площади) вызывает повреждение стволов у единичных соседних деревьев.

Список литературы

1. *Гулидова, И. Е.* Определение поверхности хвои у ели / И. Е. Гулидова. – М.: Сообщение института леса АН СССР, 1959. – Вып. 11. – С. 49–50.

2. Методы изучения лесных сообществ / Е. Н. Андреева [и др.]. – СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. – 240 с.

3. *Молчанов, А. А.* Формирование и рост дуба на вырубках в лесостепи / А. А. Молчанов, В. А. Губарева. – М.: Наука, 1965. – 256 с.

2.3. Статистические методы анализа результатов эксперимента

Статистические методы основаны на использовании накопленной статистической информации об изменении показателей, характеризующих анализируемый объект или процесс. Для анализа с использованием статистических методов необходимо, чтобы число наблюдений было достаточно большим (не менее 20–30), иначе достоверность выводов существенно снижается. При исследовании взаимосвязей между признаками на основе статистического анализа обычно ставятся следующие вопросы:

1. Существует ли связь между результатом и выбранными для анализа факторами?

2. Какова количественная мера связи?

3. Какова аналитическая форма выражения связи?

4. Какова надежность найденной закономерности и возможности использования параметров уравнения для решения оптимизационных моделей?

Ответ на первый вопрос дает дисперсионный и корреляционный анализ. Количественную меру зависимости определяют с помощью регрессионного анализа.

С теорией статистического оценивания параметров тесно связана проверка статистических гипотез. Она используется всякий раз, когда необходим обоснованный вывод о преимуществах того или иного способа инвестиций, измерений, стрельбы, технологического прогресса, об эффективности нового метода обучения, управления, о пользе вносимого удобрения, лекарства, об уровне доходности ценных бумаг, о значимости математической модели и т. д.

2.3.1. Задачи о выборках: анализ распределений, сравнение, поиск зависимостей

Анализ каждой произвольной выборки, представляющей собой совокупность независимых, одинаково распределенных случайных измерений, начинается с расчета описательных статистик эмпирического ряда: средних, дисперсии, основных моментов высшего порядка, медианы, моды, стандартного отклонения, ошибки среднего и др. Расчету элементарных статистик посвящено множество работ [8; 14; 17; 25; 32; 34]. Ряд авторов [1; 5; 13] предлагает также специальные критерии, предназначенные для оценки показателей вариации, точности опыта, репрезентативности и случайности выборок и т. д.

Особое место в анализе выборок занимает проверка соответствия характера эмпирического распределения какому-нибудь заданному закону распределения [7; 10; 15]. Это связано с тем, что вид функции распределения часто постулируется как одно из важнейших предположений применения большинства статистических методов.

Разработанную в первой трети XX в. теорию называют параметрической статистикой, поскольку ее основной объект изучения – выборки из распределений, описываемых одним или небольшим числом параметров. Наиболее общим является семейство кривых Пирсона, задаваемых четырьмя параметрами. Как правило, нельзя указать какие-либо веские причины, по которым конкретное распределение результатов экологических наблюдений должно входить в то или иное параметрическое семейство. В подавляющем большинстве реальных ситуаций таких предположений сделать нельзя, но, тем не менее, приближение реального распределения с помощью кривых из семейства Пирсона или его подсемейств часто не является чисто формальной операцией. Закономерности расчета описательных статистик в зависимости от распределения эмпирического ряда хорошо известны: если вероятностная модель основана на нормальном распределении, то расчет математического ожидания предусматривает суммирование независимых случайных ве-

личин; если же модель приближается к логарифмически нормальному распределению, то итог естественно описывать как произведение таких величин, и т. д.

В первой трети XX в. одновременно с параметрической статистикой в работах Ч. Спирмена и М. Кендалла появились первые непараметрические методы, основанные на коэффициентах ранговой корреляции, которые ныне носят имена этих статистиков [16; 29; 36]. Но непараметрика, не делающая нереалистических предположений о том, что функции распределения результатов наблюдений принадлежат тем или иным параметрическим семействам распределений, стала заметной частью статистики лишь со второй трети XX в. В 1930-е гг. появились работы А. Н. Колмогорова и Н. В. Смирнова, предложивших и изучивших статистические критерии, которые носят их имена и основаны на использовании так называемого эмпирического процесса – разности между эмпирической и теоретической функциями распределения [4; 9].

Во второй половине XX в. развитие непараметрической статистики ускорилось, в чем большую роль сыграли работы Ф. Вилкоксона и его школы [6]. К настоящему времени с помощью непараметрических методов можно решать практически тот же круг статистических задач, что и с помощью параметрических методов [24]. Все бóльшую роль играют непараметрические оценки плотности вероятности, непараметрические методы регрессии и распознавания образов (дискриминантного анализа).

Тем не менее, параметрические методы все еще популярнее непараметрических, хотя неоднократно публиковались обзоры [20; 23], свидетельствующие о том, что распределение реально наблюдаемых случайных величин (в частности, биологических данных) в подавляющем большинстве случаев отлично от нормальных (гауссовских). Теоретики продолжают строить и изучать статистические модели, основанные на гауссовости, а практики – применять подобные методы и модели («ищут под фонарем, а не там, где потеряли»). Однако полностью игнорировать классические методы не менее вредно, чем переоценивать их. Поэтому целесообразно использовать одновременно оба подхода – и параметрические методы, и непараметрическую статистику. Такая рекомендация находится в согласии с концепцией математической устойчивости, рекомендующей использовать различные методы для обработки одних и тех же данных с целью выделить выводы, получаемые одновременно при всех методах.

Любая выборка экологических данных является принципиально неоднородной, поскольку измерения могут осуществляться в различные временные периоды, в разных пространственных точках, с использованием различных инструментальных методов и т. д. В связи с этим важным этапом математической обработки является дисперсионный анализ, с помощью которого оценивается, имеют ли место статистические различия между отдельными подмножествами данных и можно ли считать

их принадлежащими одной генеральной совокупности. Если каждому измерению поставлен в соответствие один признак (фактор), определяющий условия его реализации, то говорят об однофакторном дисперсионном анализе. Если таких группообразующих факторов больше одного, то выполняется многофакторный дисперсионный анализ.

Если выборка состоит из двух рядов сопряженных наблюдений, измеренных в идентичных условиях, то решается задача регрессионного анализа, т. е. один эмпирический ряд объявляется результативным показателем или «откликом» Y, а другой – независимой варьируемой переменной X или «фактором». Теория и практика одномерного регрессионного анализа также представлена многочисленными литературными источниками [3; 11; 12; 31; 35].

2.3.2. Корректность математической обработки результатов эксперимента – залог достоверности научных положений по диссертации

Эксперимент является важнейшим средством получения новых знаний не только в области естественных и технических наук, но и в экономике, социологии, политике, психологии, литературоведении и других отраслях. Экспериментальные исследования дают критерии оценки обоснованности и приемлемости на практике любых теорий и теоретических предположений. Одним из основных этапов любого эксперимента выступает статистическая обработка экспериментальных данных. Как правило, она направлена на построение математической модели исследуемого объекта или явления, а также на получение ответа на вопрос о том, достоверны ли полученные опытные данные в пределах требуемой точности или допусков.

Сама же математическая модель в зависимости от целей эксперимента (исследование, управление, контроль) может быть использована для разных целей: для предметно-смыслового анализа объекта или явления, прогнозирования их состояния в разных условиях функционирования, управления ими в конкретных ситуациях, оптимизации отдельных параметров, решения других специфичных задач. Особенно важна тщательная математическая обработка результатов экспериментов, подтверждающая теоретические выводы и построения по диссертациям на соискание ученых степеней.

Анализ результатов работы советов по защите диссертаций, а также экспертных советов ВАК Беларуси за последнее время свидетельствует о том, что для обработки экспериментальных данных не всегда выбираются методически обоснованные приемы, да и степень владения соискателями методиками такой обработки результатов экспериментальных исследований оставляет желать лучшего. Эксперты и оппоненты по

диссертациям отмечают снижение уровня подготовленности соискателей в понимании того, что они делают с помощью современной компьютерной техники при обработке опытных данных.

Применение статистических методов обработки экспериментальных данных, критериев достоверности и соответствия моделей изучаемым процессам или явлениям, оценка точности и надежности результатов эксперимента требуют знания основных положений теории вероятностей и математической статистики, умелого использования принципов и приемов программирования. Кроме того, в связи с усложнением алгоритмов обработки данных необходимы глубокие знания основных вычислительных методов.

Статистические методы, методы вычислительной математики и программирование в вузах традиционно изучаются раздельно, и только при комплексном использовании полученных из этих курсов знаний можно достигнуть успеха. Анализ учебных планов подготовки студентов по разным специальностям свидетельствует о постоянном увеличении числа изучаемых предметов. Это ведет к уменьшению числа учебных часов, выделяемых на общеобразовательные дисциплины, в том числе и математическую подготовку. С сожалением приходится констатировать факт все более усиливающейся прагматичности обучения, т. е. все дальше мы удаляемся от основополагающего принципа советской высшей школы по фундаментальности образования. В этих условиях в учебных и научных учреждениях и организациях, имеющих аспирантуру и докторантуру, необходимо введение специальных курсов по обучению особенностям применения математических методов для планирования эксперимента, сбора информации в виде экспериментальных данных по исследуемому объекту или явлению, а также по их последующей обработке с обеспечением требований надежности и точности.

Конечной целью любой обработки экспериментальных данных является выдвижение гипотез о классе и структуре математической модели исследуемого явления, определение состава и объема дополнительных измерений, выбор возможных методов последующей статистической обработки и анализ выполнения основных предпосылок, лежащих в их основе. Для ее достижения необходимо решить некоторые частные задачи, среди которых:

1. Анализ, выбраковка и восстановление аномальных (сбитых) или пропущенных измерений. Эта задача связана с тем, что исходная экспериментальная информация обычно неоднородна по качеству. В основной массе результатов прямых измерений, получаемых с возможно малыми погрешностями, в экспериментальных данных часто имеются грубые ошибки, вызванные разными причинами. К ним могут быть отнесены просчеты экспериментатора, сбои вычислительной техники, аномалии в работе измерительных приборов и т. д. Без глубоко-

го анализа качества данных, устранения или хотя бы существенного уменьшения влияния аномальных данных на результаты последующей обработки можно сделать ложные выводы об изучаемом объекте или явлении.

2. Экспериментальная проверка законов распределения экспериментальных данных, оценка параметров и числовых характеристик наблюдаемых случайных величин или процессов. Выбор методов последующей обработки, направленной на построение и проверку адекватности математической модели исследуемому явлению, существенно зависит от закона распределения наблюдаемых величин. Предварительная обработка требует также содержательного анализа изучаемого процесса, схемы и методики проведения эксперимента.

3. Группировка исходной информации при большом объеме экспериментальных данных. При этом должны быть учтены особенности их законов распределения, которые выявлены на предыдущем этапе обработки.

4. Объединение нескольких групп измерений, полученных, возможно, в различное время или в различных условиях, для совместной обработки.

5. Выявление статистических связей и взаимовлияния различных измеряемых факторов и результирующих переменных, последовательных измерений одних и тех же величин. Решение этой задачи позволяет отобрать те переменные, которые оказывают наиболее сильное влияние на результирующий признак. Выделенные факторы используются для дальнейшей обработки, в частности, методами регрессионного анализа. Анализ корреляционных связей делает возможным выдвижение гипотез о структуре взаимосвязи переменных и, в конечном итоге, о структуре модели объекта исследований.

В ходе предварительной обработки, кроме указанных выше задач, часто решают и другие, имеющие частный характер: отображение, преобразование и унификация типа наблюдений, визуализация многомерных данных и др.

К вычисляемым в результате эксперимента оценкам случайных величин предъявляются три основных требования: состоятельность, несмещенность и эффективность. Полагают, что оценка состоятельна, если с ростом объема выборки она стремится по вероятности к истинному значению, несмещена, если ее математическое ожидание стремится к истинному значению, и эффективна, когда оценка обладает наименьшим рассеянием по сравнению с любыми другими оценками. Из двух оценок эффективнее та, которая обладает меньшей дисперсией, т. е. значения которой рассеиваются в более узком интервале.

На уровень рассеивания оценок значительное влияние оказывают ошибки, имеющие место при эксперименте.

2.3.3. Методы сравнения средних

В прикладных исследованиях часто встречаются случаи, когда средний результат некоторого признака одной серии экспериментов отличается от среднего результата другой серии. Так как средние – это результаты измерений, то, как правило, они всегда различаются, вопрос в том, можно ли объяснить обнаруженное расхождение средних неизбежными случайными ошибками эксперимента или оно вызвано определенными причинами. Если речь идет о сравнении двух средних, то можно применять критерий Стьюдента (*t*-критерий). Это параметрический критерий, так как предполагается, что признак имеет нормальное распределение в каждой серии экспериментов. В настоящее время распространено применение непараметрических критериев сравнения средних.

Сравнение средних результатов – один из способов выявления зависимостей между переменными признаками, характеризующими исследуемую совокупность объектов (наблюдений). Если при разбиении объектов исследования на подгруппы при помощи категориальной независимой переменной (предиктора) верна гипотеза о неравенстве средних некоторой зависимой переменной в подгруппах, то это означает, что существует стохастическая взаимосвязь между этой зависимой переменной и категориальным предиктором. Так, например, если установлено, что неверна гипотеза о равенстве средних показателей физического и интеллектуального развития детей в группах матерей, куривших и не куривших в период беременности, то это означает, что существует зависимость между курением матери ребенка в период беременности и его интеллектуальным и физическим развитием.

Наиболее общий метод сравнения средних – дисперсионный анализ. В терминологии дисперсионного анализа категориальный предиктор называется фактором.

Дисперсионный анализ можно определить как параметрический статистический метод, предназначенный для оценки влияния различных факторов на результат эксперимента, а также для последующего планирования экспериментов, поэтому в нем можно исследовать зависимость количественного признака от одного или нескольких качественных признаков факторов.

Кросстабуляция (сопряжение) – процесс объединения двух (или нескольких) таблиц частот так, что каждая ячейка в построенной таблице представляется единственной комбинацией значений или уровней табулированных переменных. Кросстабуляция позволяет совместить частоты появления наблюдений на разных уровнях рассматриваемых факторов. Исследуя эти частоты, можно выявить связи между табулированными переменными и исследовать структуру этой связи. Обычно табулируются категориальные или количественные переменные с отно-

сительно небольшим числом значений. Если надо табулировать непрерывную переменную (предположим, уровень сахара в крови), то вначале ее следует перекодировать, разбив диапазон изменения на небольшое число интервалов (например, уровень: низкий, средний, высокий).

При изучении качественных признаков используют частотный анализ. Таблицы частот, или, как их еще называют, одновходовые таблицы, представляют собой простейший метод анализа категориальных переменных. Таблицы частот могут быть с успехом использованы также для исследования количественных переменных, хотя при этом могут возникнуть трудности с интерпретацией результатов. Данный вид статистического исследования часто используют как одну из процедур разведочного анализа, чтобы посмотреть, каким образом различные группы наблюдений распределены в выборке, или как распределено значение признака на интервале от минимального до максимального значения. Как правило, таблицы частот графически иллюстрируются при помощи гистограмм.

По сравнению с частотным анализом, анализ соответствий содержит более мощные описательные и разведочные методы анализа двухвходовых и многовходовых таблиц. Метод, как и таблицы сопряженности, позволяет исследовать структуру и взаимосвязь группирующих переменных, включенных в таблицу. В классическом анализе соответствий частоты в таблице сопряженности стандартизуются (нормируются) таким образом, чтобы сумма элементов во всех ячейках была равна 1.

Одна из целей анализа соответствий – представление содержимого таблицы относительных частот в виде расстояний между отдельными строками и/или столбцами таблицы в пространстве более низкой размерности.

2.3.4. Дисперсионный анализ

Дисперсионный анализ (от лат. *dispersio* – рассеивание) – статистический метод, позволяющий анализировать влияние различных факторов на исследуемую переменную. Метод был разработан статистиком и биологом Р. Фишером в 1925 г. и первоначально применялся для оценки экспериментов в растениеводстве. В дальнейшем выяснилась общенаучная значимость дисперсионного анализа для экспериментов в психологии, педагогике, медицине и др. Цель дисперсионного анализа – проверка значимости различия между средними с помощью сравнения дисперсий.

Дисперсию измеряемого признака разлагают на независимые слагаемые, каждое из которых характеризует влияние того или иного фактора или их взаимодействие. Последующее сравнение таких слагаемых позволяет оценить значимость каждого изучаемого фактора, а также их

комбинации. При истинности нулевой гипотезы (о равенстве средних в нескольких группах наблюдений, выбранных из генеральной совокупности) оценка дисперсии, связанной с внутригрупповой изменчивостью, должна быть близкой к оценке межгрупповой дисперсии. На практике часто возникают задачи более общего характера – задачи проверки существенности различий средних выборочных нескольких совокупностей. Например, требуется оценить влияние различного сырья на качество производимой продукции, решить задачу о влиянии количества удобрений на урожайность сельскохозяйственной продукции. Иногда дисперсионный анализ применяется, чтобы установить однородность нескольких совокупностей (дисперсии этих совокупностей одинаковы по предположению; если дисперсионный анализ покажет, что и математические ожидания одинаковы, то в этом смысле совокупности однородны). Однородные же совокупности можно объединить в одну и тем самым получить о ней более полную информацию, а следовательно, и более надежные выводы. Выделяют однофакторный (в эксперименте участвует один фактор) и многофакторный (более одного фактора) дисперсионный анализ.

Однофакторный дисперсионный анализ. На первом этапе выделяются входной и результативный факторы. Для входного используют одновременно несколько вариантов (уровней), и каждому варианту входного фактора соответствует определенный вариант проведения опыта. Кроме того, на каждом уровне входного фактора проводят несколько наблюдений, т. е. повторяют эксперимент (4 или 5 повторностей). Методом дисперсионного анализа выявляется значимость изучаемого фактора и количественно оценивается степень его влияния. Суть метода заключается в разложении рассеивания случайной величины на независимые слагаемые, каждое из которых характеризует влияние того или иного фактора или их взаимодействие (разложение обычной дисперсии на составляющие). Степень влияния изучаемых входных факторов оценивается долей воздействия, т. е. величиной соответствующей дисперсии. Доля вклада или рассеивания рассчитывается как отношение суммы квадратов слагаемого (составляющей) к общей сумме квадратов и выражается в процентах. Общая вариация результативного признака разложена на три составляющих:

1. Вариация фактора – это и есть воздействие фактора на результативный фактор (результат).

2. Так называемая вариация повторений – оценивает закономерное действие неконтролируемых факторов внутри каждого из уровней изучаемого фактора от повторения к повторению.

3. Остаток – оценивает вклад случайных незакономерных факторов и может служить оценкой точности опыта, т. е. чем меньше 2 и 3, тем больше основной фактор.

Для оценки значимости действия изучаемого фактора рассматривается показатель статистики – критерий Фишера (*F*-критерий). Сравниваются фактическое и теоретическое значения Фишера. Фактическое значение – это отношение дисперсий варианта к дисперсии остатка. *F* теоретическое для принятого в исследовании уровня значимости находят по таблицам с учетом числа степеней свободы для дисперсии вариантов и случайной дисперсии. В большинстве случаев используют 5%-ный уровень значимости. Чем больше $F_{\text{факт.}} > F_{\text{теор.}}$, тем более закономерный характер имеет действие изучаемого фактора (между признаками существует взаимосвязь). Если это равенство выполняется, то рассчитывают НСР (наименьшую существенную разность) и *d* (разность двух выборочных средних).

НСР – теоретическое значение, означающее возможную предельную ошибку разности двух средних (как эталон, с которым сравнивается фактическое значение). Если НСР больше или равно *d*, то взаимо-связь существенна или значима, если НСР меньше *d*, то несущественна.

2.3.5. Корреляционный анализ

Между переменными (случайными величинами) может существовать функциональная связь, проявляющаяся в том, что одна из них определяется как функция от другой. Но между переменными может существовать и связь другого рода, проявляющаяся в том, что одна из них реагирует на изменение другой изменением своего закона распределения. Такую связь называют *стохастической*. Она появляется в том случае, когда имеются общие случайные факторы, влияющие на обе переменные. В качестве меры зависимости между переменными используется коэффициент корреляции (*r*), который изменяется в пределах от –1 до +1. Если коэффициент корреляции отрицательный, это означает, что с увеличением значений одной переменной значения другой убывают. Если переменные независимы, то коэффициент корреляции равен нулю (обратное утверждение верно только для переменных, имеющих нормальное распределение). Но если коэффициент корреляции не равен нулю (переменные называются некоррелированными), то это значит, что между переменными существует зависимость. Чем ближе значение *r* к 1, тем зависимость сильнее. Коэффициент корреляции достигает своих предельных значений +1 или –1 тогда и только тогда, когда зависимость между переменными линейная. Корреляционный анализ позволяет установить силу и направление стохастической взаимосвязи между переменными (случайными величинами). Если переменные измерены в интервальной шкале и имеют нормальное распределение, то корреляционный анализ осуществляется посредством вычисления коэффициен-

та корреляции Пирсона, в противном случае используются корреляции Ч. Спирмена, Дж. Кендалла.

2.3.6. Регрессионный анализ

При изучении процессов функционирования сложных систем приходится иметь дело с целым рядом одновременно действующих случайных величин. Для уяснения механизма явлений, причинно-следственных связей между элементами системы и т. д. по полученным наблюдениям необходимо попытаться установить взаимоотношения этих величин.

Если дано распределение двух случайных величин X и Y, то регрессией Y по X называется любая функция $g(X)$, приближенно представляющая статистическую зависимость Y от X.

Понятие регрессии введено в науку по предложению английского ученого Ф. Гальтона. Уравнение регрессии составляется исследователем на основе характера связи между функцией и аргументами. При установлении тесноты связи между Y и X решается задача установления строгости соблюдения функциональной зависимости между изменениями Y и X.

2.3.7. Канонический анализ

Канонический анализ предназначен для анализа зависимостей между двумя списками признаков (независимых переменных), характеризующих объекты. Например, можно изучить зависимость между различными неблагоприятными факторами и появлением определенной группы симптомов заболевания, или взаимосвязь между двумя группами клинико-лабораторных показателей (синдромов) больного. Канонический анализ является обобщением множественной корреляции как меры связи между одной переменной и множеством других переменных. Множественная корреляция есть максимальная корреляция между одной переменной и линейной функцией других переменных. Эта концепция была обобщена на случай связи между множествами переменных – признаков, характеризующих объекты. При этом достаточно ограничиться рассмотрением небольшого числа наиболее коррелированных линейных комбинаций из каждого множества. Пусть, например, первое множество переменных состоит из признаков $y_1, \ldots, y_p$, второе – из $x_1, \ldots, x_q$, тогда взаимосвязь между данными множествами можно оценить как корреляцию между линейными комбинациями $a_1y_1 + a_2y_2 + ... + a_py_p$, $b_1x_1 + b_2x_2 + ... + b_qx_q$, которая называется *канонической.* Задача канонического анализа – нахождение весовых коэффициентов таким образом, чтобы каноническая корреляция была максимальной.

2.3.8. Кластерный анализ

Кластерный анализ – это метод классификационного анализа. Его основное назначение – разбиение множества исследуемых объектов и признаков на однородные в некотором смысле группы, или кластеры. Это многомерный статистический метод, поэтому предполагается, что исходные данные могут быть значительного объема, т. е. существенно большим может быть как количество объектов исследования (наблюдений), так и признаков, характеризующих эти объекты. Главное достоинство кластерного анализа в том, что он дает возможность производить разбиение объектов не по одному, а по ряду признаков. Кроме того, кластерный анализ, в отличие от большинства математико-статистических методов, не накладывает никаких ограничений на вид рассматриваемых объектов и позволяет исследовать множество исходных данных практически произвольной природы. Так как кластеры – это группы однородности, то задача кластерного анализа заключается в том, чтобы на основании признаков объектов разбить их множество на m (m – целое) кластеров так, чтобы каждый объект принадлежал только одной группе разбиения. При этом объекты, принадлежащие одному кластеру, должны быть однородными (сходными), а объекты, принадлежащие разным кластерам, – разнородными. Если объекты кластеризации представить как точки в n-мерном пространстве признаков (n – количество признаков, характеризующих объекты), то сходство между объектами определяется через понятие расстояния между точками, так как интуитивно понятно, что чем меньше расстояние между объектами, тем они более схожи.

2.3.9. Дискриминантный анализ

Дискриминантный анализ включает статистические методы классификации многомерных наблюдений в ситуации, когда исследователь обладает так называемыми обучающими выборками. Этот вид анализа является многомерным, так как использует несколько признаков объекта, число которых может быть сколь угодно большим. Цель дискриминантного анализа состоит в том, чтобы на основе измерения различных характеристик (признаков) объекта классифицировать его, т. е. отнести к одной из нескольких заданных групп (классов) некоторым оптимальным способом. При этом предполагается, что исходные данные наряду с признаками объектов содержат категориальную (группирующую) переменную, которая определяет принадлежность объекта к той или иной группе. Поэтому в дискриминантном анализе предусмотрена проверка непротиворечивости классификации с исходной эмпирической классификацией. Под оптимальным способом понимается либо минимум математического ожидания потерь, либо

минимум вероятности ложной классификации. В общем случае задача различения (дискриминации) формулируется следующим образом. Пусть результатом наблюдения над объектом является построение k-мерного случайного вектора $X = (X_1, X_2, ..., X_k)$, где $X_1, X_2, ..., X_k$ – признаки объекта. Требуется установить правило, согласно которому по значениям координат вектора X объект относят к одной из возможных совокупностей i, $i = 1, 2, \ldots, n$. Методы дискриминации можно условно разделить на параметрические и непараметрические. В параметрических известно, что распределение векторов признаков в каждой совокупности нормально, но нет информации о параметрах этих распределений. Непараметрические методы дискриминации не требуют знаний о точном функциональном виде распределений и позволяют решать задачи дискриминации на основе незначительной априорной информации о совокупностях, что особенно ценно для практических применений. Если выполняются условия применимости дискриминантного анализа – независимые переменные-признаки (их еще называют предикторами) должны быть измерены как минимум в интервальной шкале, их распределение должно соответствовать нормальному закону, – необходимо воспользоваться классическим дискриминантным анализом, в противном случае – методом общих моделей дискриминантного анализа.

2.3.10. Факторный анализ

Факторный анализ – один из наиболее популярных многомерных статистических методов. Если кластерный и дискриминантный методы классифицируют наблюдения, разделяя их на группы однородности, то факторный анализ классифицирует признаки (переменные), описывающие наблюдения. Поэтому главная цель факторного анализа – сокращение числа переменных на основе классификации переменных и определения структуры взаимосвязей между ними. Сокращение достигается путем выделения скрытых (латентных) общих факторов, объясняющих связи между наблюдаемыми признаками объекта, т. е. вместо исходного набора переменных появится возможность анализировать данные по выделенным факторам, число которых значительно меньше исходного числа взаимосвязанных переменных.

2.3.11. Деревья классификации

Деревья классификации – это метод классификационного анализа, позволяющий предсказывать принадлежность объектов к тому или иному классу в зависимости от соответствующих значений признаков, характеризующих объекты. Признаки называются независимыми переменными, а переменная, указывающая на принадлежность объ-

ектов к классам, называется зависимой. В отличие от классического дискриминантного анализа, деревья классификации способны выполнять одномерное ветвление по переменным различных типов: категориальным, порядковым, интервальным. Не накладываются какие-либо ограничения на закон распределения количественных переменных. По аналогии с дискриминантным анализом метод дает возможность анализировать вклады отдельных переменных в процедуру классификации. Структура метода такова, что пользователь имеет возможность по управляемым параметрам строить деревья произвольной сложности, добиваясь минимальных ошибок классификации. Но по сложному дереву, из-за большой совокупности решающих правил, затруднительно классифицировать новый объект. Поэтому при построении дерева классификации пользователь должен найти разумный компромисс между сложностью дерева и трудоемкостью процедуры классификации.

2.3.12. Анализ главных компонент и классификация

На практике часто возникает задача анализа данных большой размерности. Метод анализа главных компонент и классификации позволяет решить эту задачу и служит для достижения двух целей:

- уменьшение общего числа переменных (редукция данных) для того, чтобы получить «главные» и «некоррелирующие» переменные;
- классификация переменных и наблюдений при помощи строящегося факторного пространства.

Метод схож с факторным анализом в постановочной части решаемых задач, но имеет ряд существенных отличий:

- при анализе главных компонент не используются итеративные методы для извлечения факторов;
- наряду с активными переменными и наблюдениями, используемыми для извлечения главных компонент, можно задать вспомогательные переменные и/или наблюдения; затем вспомогательные переменные и наблюдения проектируются на факторное пространство, вычисленное на основе активных переменных и наблюдений;
- перечисленные возможности позволяют использовать метод как мощное средство для классификации одновременно переменных и наблюдений.

Решение основной задачи метода достигается созданием векторного пространства латентных (скрытых) переменных (факторов) с размерностью меньше исходной. Исходная размерность определяется числом переменных для анализа в исходных данных.

2.3.13. Многомерное шкалирование

Данный метод можно рассматривать как альтернативу факторному анализу, в котором достигается сокращение числа переменных путем выделения латентных (непосредственно не наблюдаемых) факторов, объясняющих связи между наблюдаемыми переменными. Цель многомерного шкалирования – поиск и интерпретация латентных переменных, дающих возможность пользователю объяснить сходство между объектами, заданными точками в исходном пространстве признаков. Показателями сходства объектов на практике могут быть расстояния или степени связи между ними. Основное предположение многомерного шкалирования заключается в том, что существует некоторое метрическое пространство существенных базовых характеристик, которые неявно и послужили основой для полученных эмпирических данных о близости между парами объектов. Следовательно, объекты можно представить как точки в этом пространстве. Предполагают также, что более близким (по исходной матрице) объектам соответствуют меньшие расстояния в пространстве базовых характеристик. Поэтому многомерное шкалирование – это совокупность методов анализа эмпирических данных о близости объектов, с помощью которых определяется размерность пространства существенных для данной содержательной задачи характеристик измеряемых объектов и конструируется конфигурация точек (объектов) в этом пространстве. Обычно это пространство («многомерная шкала») аналогично используемым шкалам в том смысле, что значениям существенных характеристик измеряемых объектов соответствуют определенные позиции на осях пространства.

2.3.14. Методы анализа выживаемости

Методы анализа выживаемости первоначально были развиты в медицинских, биологических исследованиях и страховании, но затем стали широко применяться в социальных и экономических науках, а также в промышленности в инженерных задачах (анализ надежности и времен отказов). Представим, что изучается эффективность нового метода лечения или лекарственного препарата. Очевидно, наиболее важной и объективной характеристикой является средняя продолжительность жизни пациентов с момента поступления в клинику или средняя продолжительность ремиссии заболевания. Для описания средних времен жизни или ремиссии можно было бы использовать стандартные параметрические и непараметрические методы. Однако в анализируемых данных есть существенная особенность – могут найтись пациенты, которые в течение всего периода наблюдения выжили, а у некоторых из них заболевание все еще находится в стадии ремиссии. Также мо-

жет образоваться группа больных, контакт с которыми был потерян до завершения эксперимента (например, их перевели в другие клиники). При использовании стандартных методов оценки среднего эту группу пациентов пришлось бы исключить, тем самым потеряв с трудом собранную важную информацию. К тому же большинство этих пациентов являются выжившими (выздоровевшими) в течение того времени, которое их наблюдали, что свидетельствует в пользу нового метода лечения (лекарственного препарата). Такого рода информация, когда нет данных о наступлении интересующего нас события, называется *неполной.* Если есть данные о наступлении интересующего нас события, то информация называется *полной.* Наблюдения, которые содержат неполную информацию, называются *цензурированными.* Они типичны, когда наблюдаемая величина представляет время до наступления некоторого критического события, а продолжительность наблюдения ограничена по времени.

Использование цензурированных наблюдений составляет специфику метода анализа выживаемости. В нем исследуются вероятностные характеристики интервалов времени между последовательным возникновением критических событий. Такого рода исследования называются *анализом длительностей до момента прекращения,* которые можно определить как интервалы времени между началом наблюдения за объектом и моментом прекращения, при котором объект перестает отвечать заданным для наблюдения свойствам. Цель исследований – определение условных вероятностей, связанных с длительностями до момента прекращения.

Построение таблиц времен жизни, подгонка распределения выживаемости, оценивание функции выживания с помощью процедуры Каплана – Мейера относятся к описательным методам исследования цензурированных данных. Некоторые из предложенных методов позволяют сравнивать выживаемость в двух и более группах.

Наконец, анализ выживаемости содержит регрессионные модели для оценивания зависимостей между многомерными непрерывными переменными со значениями, аналогичными временам жизни.

2.3.15. Планирование экспериментов

Искусство располагать наблюдения в определенном порядке или проводить специально спланированные проверки с целью полного использования возможностей этих методов и составляет содержание предмета планирования эксперимента. В настоящее время экспериментальные методы широко используются как в науке, так и в различных областях практической деятельности. Обычно основная цель научного исследования состоит в том, чтобы показать статистическую зна-

чимость эффекта воздействия определенного фактора на изучаемую зависимую переменную. Как правило, основная цель планирования экспериментов заключается в извлечении максимального количества объективной информации о влиянии изучаемых факторов на интересующий исследователя показатель (зависимую переменную) с помощью наименьшего числа дорогостоящих наблюдений. К сожалению, на практике, в большинстве случаев, недостаточное внимание уделяется планированию исследований. Сначала собирают данные (столько, сколько могут собрать), а потом уже проводят статистическую обработку и анализ. Но сам по себе правильно проведенный статистический анализ недостаточен для достижения научной достоверности, поскольку качество любой информации, получаемой в результате анализа данных, зависит от качества самих данных. Поэтому планирование экспериментов находит все большее применение в прикладных исследованиях. Целью методов планирования экспериментов является изучение влияния определенных факторов на исследуемый процесс и поиск оптимальных уровней факторов, определяющих требуемый уровень течения данного процесса.

Эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания уровней факторов, называется *полнофакторным*. Каждый фактор может иметь два уровня: нижний уровень обозначают –1, верхний – +1. План такого эксперимента для изучения влияния двух уровней двух факторов (ПФЭ 2^2) представлен в таблице 10.

Таблица 10

Опыт с двумя уровнями двух факторов

№ опыта	Уровни факторов	
	X_1	X_2
1	–	–
2	+	–
3	–	+
4	+	+

При составлении матриц планирования первая строка всегда будет содержать все факторы на нижнем уровне, т. е. состоять только из «–». Последняя строка будет состоять только из «+». В столбце фактора X_1 знаки «+» и «–» чередуются через один, во втором столбце следуют сначала два знака «–», потом два знака «+» и т. д. до конца. В третьем столбце чередование знаков идет группами по четыре, в четвертом – группами по восемь. Добавление каждого нового фактора приводит к удвоению числа опытов, так что обозначение $2n$ указывает, что n факторов варьируют на двух уровнях каждый и испытывают все возможные комбинации этих уровней: $N = 2n$ (таблицы 11, 12).

Таблица 11

Опыт с двумя уровнями трех факторов

№ опыта	Уровни факторов		
	X_1	X_2	X_3
1	–	–	–
2	+	–	–
3	–	+	–
4	+	+	–
5	–	–	+
6	+	–	+
7	–	+	+
8	+	+	+

Таблица 12

Опыт с двумя уровнями четырех факторов

№ опыта	Уровни факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4
1	–	–	–	–
2	+	–	–	–
3	–	+	–	–
4	+	+	–	–
5	–	–	+	–
6	+	–	+	–
7	–	+	+	–
8	+	+	+	–
9	–	–	–	+
10	+	–	–	+
11	–	+	–	+
12	+	+	–	+
13	–	–	+	+
14	+	–	+	+
15	–	+	+	+
16	+	+	+	+

Для обработки полученных таким образом экспериментальных данных существуют специальные методы. При необходимости применяют более сложные экспериментальные планы (метод латинского квадрата и прямоугольника, метод греко-латинского квадрата, метод расщепленных делянок, смешивание, метод рендомизированных повторений и др.) [19; 22].

Список литературы

1. *Айвазян, С. А.* Прикладная статистика: основы моделирования и первичная обработка данных / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин; под ред. С. А. Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 471с.

2. *Айвазян, С. А.* Прикладная статистика. Основы эконометрики: в 2 т. / С. А. Айвазян, В. С. Мхитарян. – 2-е изд. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001.

3. *Андерсен, Т.* Введение в многомерный статистический анализ / Т. Андерсен. – М.: Физматгиз, 1963. – 500 с.

4. *Большев, Л. Н.* Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – М.: Наука, 1983. – 416 с.

5. *Браунли, К. А.* Статистическая теория и методология в науке и технике / К. А. Браунли. – М.: Наука, 1977. – 407 с.

6. *Гаек, Я.* Теория ранговых критериев / Я. Гаек, З. Шидак. – М.: Наука, 1971. – 376 с.

7. *Гмурман, В. Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учебное пособие для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2004. – 404 с.

8. *Гнеденко, Б. В.* Курс теории вероятностей: учебник / Б. В. Гнеденко. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 448 с.

9. *Гублер, Е. В.* Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях / Е. В. Гублер, А. А. Генкин. – Л.: Медицина, 1973. – 141 с.

10. *Джонсон, Н.* Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных: в 2 т. / Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – Т. 1; 1981. – Т. 2.

11. *Дрейпер, Н.* Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн / Н. Дрейпер, Г. Смит. – М.: Финансы и статистика, 1986. – Кн. 1; 1987. – Кн. 2.

12. *Дюк, В.* Обработка данных на ПК в примерах / В. Дюк. – СПб.: Питер, 1997. – 240 с.

13. *Зайцев, Г. Н.* Математическая статистика в экспериментальной ботанике / Г. Н. Зайцев. – М.: Наука, 1984. – 424 с.

14. *Калинина, В. Н.* Математическая статистика: учебник для ссузов / В. Н. Калинина, В. Ф. Панкин. – М.: Академия, 2001. – 336 с.

15. *Кендалл, М.* Ранговые корреляции / М. Кендалл. – М.: Статистика, 1975. – 216 с.

16. *Кендалл, М.* Теория распределений / М. Кендалл, А. Стьюарт; пер. с англ. В. В. Сазонова и А. Н. Ширяева; под ред. А. Н. Колмогорова. – М.: Наука, 1966. – Т. 1. – 588 с.

17. *Крамер, Г.* Математические методы статистики / Г. Крамер; пер. с англ. А. С. Монина и А. А. Петрова; под ред. акад. А. Н. Колмогорова. – М.: Мир, 1975. – 648 с.

18. *Любимов, В. Б.* Математические методы в экологии: учебное пособие / В. Б. Любимов, К. В. Балина, И. В. Мельников // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 8(2). – С. 272–273.

19. *Максимов, В. Н.* Детерминационный анализ связей между различными компонентами экосистем. Сравнение с методами традиционной статистики / В. Н. Максимов, Н. Г. Булгаков, Г. Ф. Милованова // Известия РАН. Сер. биол. – 1999. – № 4. – С. 469–477.

20. *Максимов, В. Н.* Многофакторный эксперимент в биологии / В. Н. Максимов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1980. – 280 с.

21. *Мамеева, В. Е.* Системный анализ и основы моделирования экосистем: учебно-методическое пособие к лабораторно-практическим работам для сту-

дентов, обучающихся по специальности 110102 агроэкология / В. Е. Мамеева. – Брянск: Изд-во Брян. ГСХА, 2011. – 132 с.

22. *Монтгомери, Д. К.* Планирование эксперимента и анализ данных: пер с англ. / Д. К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 1980. – 384 с.

23. *Налимов, В. В.* Применение математической статистики при анализе вещества / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1960. – 432 с.

24. *Никитин, Я. Ю.* Асимптотическая эффективность непараметрических критериев / Я. Ю. Никитин. – М.: Наука: Физматлит, 1995. – 238 с.

25. *Прохоров, Ю. В.* Лекции по теории вероятностей и математической статистике: учебник / Ю. В. Прохоров, Л. С. Пономаренко. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2012. – 256.

26. *Пузаченко, Ю. Г.* Математические методы в экологических и географических исследованиях: учебное пособие для студентов вузов / Ю. Г. Пузаченко. – М.: Академия, 2004. – 416 с.

27. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии: учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2000. – 396 с.

28. *Рокицкий, П. Ф.* Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск: Высш. шк., 1973. – 320 с.

29. *Рунион, Р.* Справочник по непараметрической статистике. Современный подход / Р. Рунион; пер. с англ. Е. З. Демиденко; предисл. Ю. Н. Тюрина. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 198 с.

30. *Светозаров, В. В.* Основы статистической обработки результатов измерений: учебное пособие / В. В. Светозаров. – М.: Изд. МИФИ, 2005. – 40 с.

31. *Себер, Дж.* Линейный регрессионный анализ / Дж. Себер. – М.: Мир, 1980. – 286 с.

32. *Смирнов, Н. В.* Курс теории вероятностей и математической статистики / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Наука, 1969. – 512 с.

33. *Советов, Б. Я.* Моделирование систем: учебник для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

34. *Урбах, В. Ю.* Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях / В. Ю. Урбах. – М.: Медицина, 1975. – 296 с.

35. *Хальд, А.* Математическая статистика с техническими приложениями / А. Хальд. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – 664 с.

36. *Холлендер, М.* Непараметрические методы статистики / М. Холлендер, Д. Вульф; под ред. Ю. П. Адлера и Ю. Н. Тюрина; пер. с англ. Д. С. Шмерлинга. – М.: Финансы и статистика, 1983. – 518 с.

ГЛАВА 3
ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

3.1. Информация в современном обществе

Информация – это сведения, передаваемые людьми устным, письменным или другим способом.

С момента появления человека как биологического вида роль информации в обществе постоянно возрастала. Сначала это была передача жизненно важного опыта – информации о съедобных растениях, основах охоты, устройстве жилища, лечении недугов. Однако общество непрерывно развивалось. Если вначале оно было представлено племенами, то затем возникли общины, царства, государства. Информация концентрировалась внутри этих структур, но с развитием транспорта и средств связи мир постепенно стал превращаться в сложную и неоднородную, но единую структуру. Сегодня уже можно говорить о глобальной структуре политических, экономических и культурных отношений, простирающихся за любые традиционные границы и связывающих отдельные общества в единую систему. Этот процесс объединения называют *глобализацией*.

В политической сфере имеют место наднациональные единицы различного масштаба: политические и военные блоки (например, НАТО), имперские сферы влияния (страны бывшего социалистического лагеря), коалиции правящих групп («Большая восьмерка»), континентальные или региональные объединения (Европейское сообщество), всемирные международные организации (в первую очередь ООН). Можно заметить также контуры всемирного правительства, когда ряд важных функций выполняется наднациональными учреждениями (например, Европейским парламентом, Международным судом в Гааге, Международным трибуналом или Интерполом), и признаки растущей политической однородности. Мировой банк и Международный валютный фонд оказывают возрастающее влияние на внутреннюю политику государств во всем мире. Также все возрастающую роль играют неправительственные организации, такие как Гринпис, Фонд охраны дикой природы и др.

В экономической сфере усиливается значение наднациональной координации и интеграции (ЕС, ОПЕК), региональных и мировых экономических соглашений. Наблюдается глобальное разделение труда, уве-

личивается роль транснациональных корпораций, причем некоторые из них обладают доходом, превышающим доход среднего национального государства.

В культуре тоже доминирует тенденция к единообразию. Миллионы людей становятся свидетелями событий, произошедших в разных местах, приобщаются к одному и тому же культурному опыту (олимпиады, концерты), что способствует унификации их вкусов, восприятий, предпочтений. Все это освещается мировыми информационными службами. Одни и те же потребительские товары распространяются повсюду. Миграции, временная работа за границей, туризм обеспечивают непосредственное знакомство с образом жизни, обычаями, нормами поведения в других странах.

Компьютерные технологии способствуют развитию, углублению и унификации: одни и те же программы, используемые во всем мире, становятся единым образцом организации и обработки информации.

Место страны в современном мире сегодня в основном определяется качеством человеческого капитала, состоянием образования и степенью использования науки и техники в производстве. Изобилие рабочей силы и сырьевых материалов все меньше можно расценивать как конкурентное преимущество и зависит от того, как снижается доля этих факторов в создании стоимости продуктов.

Сегодня наиболее быстро растущие секторы экономики – не производство продовольствия или автомобилей, а программное обеспечение, телекоммуникации и широкий набор услуг – от финансов и служб новостей до образования и организации досуга. Компьютеры, программное обеспечение и связанные с ними продукты и услуги стимулируют экономический рост при минимальных затратах материальных ресурсов. В США уже к концу XX в. был преодолен важный порог, когда рыночная капитализация корпорации Microsoft превысила соответствующий показатель для General Motors, что ознаменовало переход эстафеты первенства к новому поколению технологий.

3.1.1. Совершенствование способов передачи информации

С развитием структуры общества эволюционировали и способы передачи информации.

Первым шагом в распространении информации можно назвать появление письменности, которая способствовала распространению знаний и сохранению их для передачи последующим поколениям. Однако книги были редкостью, их писали и переписывали от руки, ценились они на вес золота и имели свою историю.

Следующим этапом было изобретение в XV в. немцем И. Гутенбергом книгопечатания, которое очень сильно повлияло на культуру и раз-

витие общества в целом. Печатный станок превратил книгу из произведения искусства в средство передачи информации.

Далее развитие средств передачи информации было связано с применением в промышленности электричества и химии, изобретением таких важнейших средств связи, как телеграф, телефон, радио, осуществлением передачи электрической энергии на расстояние, созданием синтетических материалов.

Первая электронно-вычислительная машина была создана в 1946 г. Тогда считалось, что компьютеры будут применяться в основном военными и учеными для расчетов и математического моделирования. В 1959 г. были сделаны первые интегральные схемы, состоящие из нескольких транзисторов, соединенных на едином слое полупроводникового материала. В последующие годы производственные издержки по изготовлению и соединению электронных компонентов резко снизились с увеличением числа компонентов, которые возможно было разместить на одной микросхеме. В результате последовательного совершенствования производственного процесса стало возможным соединение все более мелких и дешевых, но при этом более мощных компонентов. В 1972 г. был изготовлен первый микропроцессор – ключевой элемент простого компьютера, размещенный на одной микросхеме.

Развитие вычислительной техники прошло этапы от электронных счетных машин, работающих на электронных лампах со скоростью 10–20 тысяч операций в секунду, до персональных компьютеров, работающих на кремниевых микрочипах со скоростью в сотни миллионов операций в секунду.

Затем революция в области информационных и телекоммуникационных технологий начала набирать силу за счет неуклонного роста соотношения между мощностью вычислительной техники и стоимостью электронно-вычислительных операций, расширения цифровых систем и быстрого снижения издержек по передаче информации по различным каналам связи.

Мощность вычислительной техники в расчете на один вложенный доллар возросла в 10 тысяч раз за последние 20 лет XX века. Стоимость сетей звукопередачи снизилась за те же 20 лет приблизительно в 10 тысяч раз в основном благодаря появлению оптоволоконных проводов, недорогой электроники и беспроводных технологий. По единому тончайшему оптоволоконному кабелю могут передаваться тысячи телефонных разговоров, в результате чего стоимость линии звукопередачи сводится к бесконечно малой величине. Падение цен на электронику позволило снизить стоимость и повысить надежность телефонных станций. Беспроводные системы открыли возможность для предоставления услуг без высоких капитальных затрат на строительство линий. Цифровые технологии способствовали интеграции телекоммуникаци-

онной и вычислительной отрасли и соединению сегментов информатики для обеспечения услуг по обработке речи, текста, изображения, данных и видеоинформации, что раскрывает колоссальные возможности для обеспечения быстрой связи между людьми.

В 1990-х гг. выросла глобальная компьютерная сеть Интернет, доступная всем жителям планеты. С ее возникновением исчезли последние барьеры на пути свободного распространения данных, каждый человек получил доступ ко всей открытой информации.

Несмотря на то, что традиционные каналы связи не утратят своего значения в будущем, новые информационные и телекоммуникационные технологии открывают большие возможности для широкого распространения информации при низких затратах. В настоящее время человечество приближается к созданию системы, в которой телефон, Интернет, телевидение и передача данных будут использовать общую цифровую информационную инфраструктуру.

3.1.2. Информация как экологический фактор

Экологическая информация – это любая информация в письменной, аудиовизуальной, электронной или другой материальной форме, касающаяся:

• состояния элементов окружающей среды, таких как атмосфера, вода, почва, земля, ландшафт, биологическое разнообразие и его компоненты, включая генетически измененные организмы, и взаимодействие между ними;

• факторов, таких как шумовой фон, излучение, вещества, энергия, а также деятельность в области охраны окружающей среды, политики, законодательства, программ, оказывающих или способных оказывать воздействие на элементы окружающей среды;

• состояния здоровья и безопасности людей, условий их жизни, состояния объектов культуры, зданий, сооружений в той степени, в какой на них воздействует или может воздействовать состояние элементов окружающей среды.

Информация как экологический фактор проявляется в своем воздействии на живые системы (пчелы передают друг другу информацию о месте, где расположены цветущие медоносы; человек, узнав прогноз погоды, может одеться теплее, взять зонт и т. д.). Степень воздействия информации и реакция общества зависят от навыков общества пользоваться информацией. Навыки использования информации как экологического фактора заключаются в следующем:

• корректный сбор информации;

• систематизация полученной информации;

• анализ и нахождение зависимости между полученными группами первичной информации;

• формализация связей и получение выводов (новая информация);
• прогнозы и моделирование ситуации.

Современные информационные технологии повсеместно входят не только в деловую жизнь, но и в наш быт, позволяют быстро и качественно собирать и передавать информацию, в том числе о состоянии окружающей среды. Любой вид деятельности, который осуществим на экране или по телефону, – от подготовки программного обеспечения до продажи авиабилетов, – возможно произвести в любой точке мира, связанной с головным учреждением через спутник или компьютер. Но даже в наш высокотехнологичный информационный век человеческое общество не может процветать, а мир природы постепенно деградирует. Наши продовольственные культуры и натуральные лекарственные средства – лишь производные дикорастущих растений, и даже генная инженерия основана на перегруппировке генов, созданных самой природой. Кроме того, люди нуждаются в экосистемах с чистой водой, воздухом, с богатым животным и растительным миром для поддержания благоприятных условий существования и сохранения жизни.

Как известно, к отрицательному воздействию на окружающую среду приводит не недостаток экологической информации, а ее неправильное применение. Так, основное место в системе принятия экологически важных и обоснованных решений играют информация и пути ее использования. Интернет в настоящее время служит основным способом хранения и передачи информации, однако многое зависит именно от качества информации, ее достоверности, методов обработки и подачи.

Для правильного анализа какой-либо проблемы необходимо получить о ней достаточное количество информации, для чего проводится ряд исследований. Основными методами экологических исследований являются наблюдение, эксперимент и моделирование.

Наблюдение – изучение системы в естественных условиях, не нарушающее существующих закономерностей и связей в ней. Задачи наблюдений:

• выделение основных типов экосистем и их связей в изучаемом ландшафте;

• определение видового состава организмов, населяющих каждую экосистему, установление типа почвы, подпочвы, характера гидрологического режима;

• качественное определение структуры экосистемы (общая картина взаимоотношений между видами, связи организмов с почвой, приземным слоем воздуха и т. д.);

• количественные оценки состава экосистемы: плотность популяций, состояние микроклимата (значения температуры, влажности, концентрации), состояние почвы (температура, влажность, элементы питания);

• комплексное описание динамики всех компонентов экосистемы в сезонном, годовом и многолетнем планах, что является основой для анализа закономерностей функционирования данной системы.

Эксперимент – специальное изменение условий существования систем или составляющих их элементов для выявления интересующих нас вопросов. Разновидности экспериментов:

• неконтролируемые – в начале опыта на экосистему производят некое воздействие и следят за ее развитием, которое происходит на фоне всевозможных внешних воздействий;

• частично контролируемые – можно управлять лишь некоторыми факторами;

• контролируемые – есть возможность контролировать все интересующие нас факторы.

Моделирование – разработка и создание моделей, имитирующих естественные экосистемы.

Данные методы исследований используют в системе мониторинга окружающей среды. Под мониторингом понимается комплексная система наблюдений, оценки и прогноза изменений природных сред, природных ресурсов, растительного и животного мира, позволяющая выделить изменения их состояния и происходящие в них процессы под влиянием антропогенной деятельности.

Огромное количество информации, накопленное по различным проблемам, в настоящее время находится в специально созданных базах данных, среди которых:

1) ГСМОС – глобальная система мониторинга окружающей среды;

2) МРПТХВ – международный регистр потенциально токсичных химических веществ;

3) Инфотерра – международная информационно-справочная система по окружающей среде;

4) ГИС – географические информационные системы;

5) GRID (global resources information database) – глобальная база данных о ресурсах.

3.1.3. Экосистемы как сложные объекты управления

Сложность создания моделей экосистем заключается в следующем:

• необходимо учитывать разнообразные взаимодействия между множеством организмов и факторов;

• все взаимодействия являются динамическими, зависят от времени и постоянно изменяются;

• наличие «обратных связей», т. е. некоторые эффекты процесса возвращаются к своему источнику или к предыдущей стадии, в результате чего эти эффекты усиливаются или видоизменяются. Различают положительные (усиление эффекта) и отрицательные (ослабление эффекта)

обратные связи. Сама обратная связь может быть достаточно сложной, включать в себя ряд положительных и отрицательных эффектов, а последствия могут зависеть от факторов окружающей среды;

• изменчивость живых организмов может проявляться при взаимодействии друг с другом (в процессе конкуренции, хищничества) или в реакции живых организмов на условия окружающей среды;

• изменчивость факторов среды (климат, характер местообитания).

Следовательно, анализ таких систем очень сложен.

3.1.4. Правовые основы использования экологической информации

25 июня 1998 г. подписана международная Орхусская конвенция о доступе к информации, участии общественности в процессе принятия решений и доступе к правосудию по вопросам, касающимся окружающей среды. На территории Республики Беларусь данная конвенция вступила в действие в марте 2000 г. Этот документ создан для защиты права каждого человека жить в окружающей среде, благоприятной для его здоровья и благосостояния, и гарантирует право на доступ к информации.

Наряду с данной конвенцией право доступа к экологической информации гарантируется Законом об охране окружающей среды, Законом о государственной экологической экспертизе, Законом о санитарно-эпидемиологическом благополучии населения, Законом о социальной защите граждан, пострадавших в результате аварии на ЧАЭС, и другими нормативно-правовыми актами.

Ответственность официальных лиц в случае предоставления искаженной или неполной информации установлена ст. 46 Административного кодекса Республики Беларусь.

За предоставление экологической информации ответственны следующие институты:

• отдел информации и связей с общественностью при Министерстве природных ресурсов и охраны окружающей среды;

• Министерство здравоохранения, национальные и областные эпидемиологические комитеты;

• Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды;

• в случае чрезвычайных ситуаций – Министерство по чрезвычайным ситуациям.

Методами активного распространения экологической информации являются сообщения в средствах массовой информации, публикации в виде отдельных документов, презентации, конференции, семинары.

В реальной жизни мы всегда говорим о ценности тех или иных сведений и о ценности информации. Эти оценки строятся в соответствии

с субъективным пониманием цели, и информация, которая, как нам кажется, приближает нас к более быстрому достижению цели или более надежно оберегает нас от кажущихся ошибок, действительно воспринимается как более ценная. В рамках взаимодействия субъекта с информацией ее ценность по мере использования очевидным образом теряется.

Поскольку в информацию вложен человеческий труд, она может рассматриваться как товар. Если на нее нет спроса, то у нее нет и стоимости. Ценность информации определяется в системе «спрос – предложение», и здесь начинают действовать вполне объективные законы рынка, проблема практической ценности информации становится чисто экономической.

Список литературы

1. *Гершензон, В. Е.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания: учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / В. Е. Гершензон, Е. В. Смирнова, В. В. Элиас; под ред. В. Е. Гершензона. – М.: Академия, 2003. – 288 с.

2. Знания на службе развития: отчет о мировом развитии. 1998/99. Включая выборочные показатели мирового развития. – М.: Весь мир: Всемирный банк, 1999. – 320 с.

3. Состояние мира 2002. Доклад института Worldwatch о развитии по пути к устойчивому обществу: пер. с англ. – М.: Весь мир, 2003. – 324 с.

4. *Штомпка, П.* Социология социальных изменений: пер. с англ. / П. Штомпка; под ред. В. А. Ядова. – М., 1996. – 416 с.

3.2. Экологические информационные системы

3.2.1. Структура информационных систем

Информационные системы – это системы хранения, обработки, преобразования, передачи и обновления информации с использованием компьютерной и другой техники.

Сбор, хранение, переработку и передачу данных называют информационными процессами.

Наличие достоверной информации будет содействовать повышению научной обоснованности прогнозов и комплексной оценки состояния окружающей среды, рациональному использованию природных ресурсов. В основе любой информационной системы лежит блок связи, состоящий из источника информации, а также ее передатчика, приемника и получателя.

Источник информации в соответствии с его конструкцией, назначением, способом физической реализации в фиксированный момент времени избирает одно из совокупности возможных сообщений. В частном

случае источником информации может быть измерительное устройство или человек, выполняющий функции наблюдателя.

Передатчик определенным образом преобразует сигнал в форму, удобную для передачи. Это может быть цифровое кодирование аналогового сигнала, если источник информации – измерительное устройство, или закодированное сообщение в случае, когда речь идет о наблюдателе.

Канал связи есть просто среда (воздух, вода), передающая сигнал от передатчика к приемнику. По одной и той же среде может проходить одновременно множество сигналов, в том числе и не предназначенных для конкретного приемника.

При прохождении сигнала могут возникать его искажения. В информационных системах о состоянии окружающей среды искажения сообщений или отдельных сигналов – достаточно обычное явление. В таких искажениях часто заинтересованы как те, кто загрязняет среду, так и те, кто стоит на ее защите. Первые заинтересованы в сокрытии неблагополучной обстановки, стремятся не передавать экстремального значения или организовывать наблюдения таким образом, чтобы экстремальные значения встречались с минимальной вероятностью. Вторые, напротив, склонны преувеличивать масштабы загрязнения. и действуют диаметрально противоположно. В связи с этим методы подавления искажений экологической информации имеют весьма большое значение.

Кроме умышленных, могут быть и неумышленные искажения, возникающие в результате воздействия на сигнал других источников информации. Такие искажения подавляются в первую очередь улучшением качества канала связи или методами кодирования информации. Приемник преобразует принятый сигнал и восстанавливает по нему первоначальное сообщение. Обычно действие приемника по смыслу обратно действию передатчика. В частных случаях приемник может специальным образом перекодировать сообщение в соответствии с потребностями получателя или потребителя

Несмотря на огромный арсенал методов анализа, проблема обработки информации и превращения ее из множества неупорядоченных фактов в систему, которую можно определить как «истинные» знания, остается чрезвычайно сложной и в общем случае нерешенной. Парадоксально, но возможности современной вычислительной техники создают даже своеобразный тупик.

3.2.2. Базы данных, системы управления базами данных, банки данных

В настоящее время термины «база данных» и «система управления базами данных» используются исключительно как относящиеся

к компьютерам. В общем смысле термин «база данных» можно применить к любой совокупности связанной информации, объединенной по определенному признаку. Например, в качестве базы данных можно рассматривать расписание движения поездов или книгу регистрации данных о заказах покупателей и их выполнении.

База данных (БД) – совокупность связанных данных, организованных по определенным правилам, предусматривающим общие принципы описания, хранения и манипулирования, независимая от прикладных программ. Это понятие вошло в употребление в 1960-е гг. БД представляет собой информационную модель предметной области, например, экологическая база данных по конкретному региону может содержать информацию о природных условиях территории, о населении, природных и антропогенных загрязнителях окружающей среды и их источниках и т. п.

За выработку требований к БД, ее проектирование, реализацию, эффективное использование и сопровождение отвечает администратор.

БД можно разделить на несколько типов:

1) графическая – содержит графические данные;

2) документографическая – содержит библиографические описания документов и (или) их рефераты;

3) картографическая – содержит совокупность взаимосвязанных картографических данных по определенной предметной области, представленная в цифровой форме при соблюдении общих правил описания, хранения и манипулирования данными;

4) объектографическая/фактографическая – содержит расширенный набор данных о сложных объектах предметной области;

5) полнотекстовая – содержит записи полнотекстовых документов или их частей;

6) проблемно ориентированная – содержит тематически связанные документы и/или данные, предназначенные для решения прикладных задач определенного вида.

Организация БД должна удовлетворять следующим требованиям:

- данные сохраняются так, чтобы они были независимы от использующих их программ;
- для добавления новых или модификации существующих данных, а также для их поиска в БД применяется общий способ управления;
- хранение данных должно характеризоваться такой минимальной избыточностью, которая допускает их использование лучшим образом для одного или нескольких применений.

Работа с БД осуществляется с помощью системы управления ими.

Система управления базами данных (СУБД) – комплекс программных и лингвистических средств общего или специального назначения, реализующий поддержку создания баз данных, централизован-

ного управления и организации доступа к ним различных пользователей в условиях принятой технологии обработки данных.

Основные функции баз данных в управлении качеством окружающей среды – собственно информационная база и основа для работы географических информационных систем.

Банк данных – автоматизированная информационная система централизованного хранения и коллективного использования данных. В состав банка данных входят одна или несколько баз данных, справочник баз данных, СУБД, а также библиотеки запросов и прикладных программ.

Важно уяснить возможности, ограничения и специфику экологического банка данных при его использовании в решении проблем охраны окружающей среды и здоровья населения. При создании экологического банка данных важно выяснить, как будут реализованы:

- стандартизация и идентификация используемых терминов;
- проектирование архитектуры вычислительного комплекса как технического обеспечения банка данных;
- регистрация, сбор и хранение данных об исследуемых объектах окружающей среды;
- решение задач совместимости банка данных с пакетами прикладных программ для обработки данных;
- обеспечение широкого доступа к банку пользователей-непрограммистов;
- планирование и управление процессом создания и функционирования банка данных.

3.2.3. Способы «общения» с экологическими базами данных

Важным вопросом для пользователей является интерфейс с БД. Выделим следующие шесть видов интерфейсов, которые рассчитаны на обслуживание различных категорий пользователей и различаются своими потребностями:

1. *Интерфейсы командного типа.* Ориентированы на использование структурированных команд, которые вводятся с клавиатуры. Это вполне приемлемый и эффективный способ для случая, когда один и тот же пользователь многократно использует небольшое число редко меняющихся команд. Эти команды могут быть в значительной степени шифрованными и неестественными, однако, поскольку их мало, такие команды вполне можно запомнить.

2. *Структурированные языки запросов для БД.* По мнению многих пользователей, этот вид интерфейса схож с командными. Действительно, это те же команды, однако язык запросов, как правило, в большей

степени напоминает естественный язык. Структурированные языки хороши для конечных пользователей, которые работают с ними достаточно часто и готовы потратить время на их изучение. Такие языки характеризуются гораздо большей гибкостью, чем интерфейсы командного типа.

3. И*нтерфейс, напоминающий язык запросов.* Он встраивается в стандартные языки программирования высокого уровня, так что программисты могут использовать операторы доступа к БД и функции системы БД непосредственно в программах, написанных на этих языках. Подобные интерфейсы предназначены для программистов.

4. *Интерфейсы, построенные на основе меню.* Предназначены для пользователя-непрограммиста, при работе с ними пользователь только выбирает нужные варианты из короткого меню возможных команд.

5. *Интерфейс на основе бланков.* Если требуется реализация более сложных функций, можно организовать меню по иерархическому признаку, чтобы в любой конкретный момент времени на дисплее воспроизводилось небольшое число вариантов, и это упрощает взаимодействие с пользователем. На экране дисплея воспроизводится некий формат. Он может иметь пустые места, которые должен заполнить пользователь, предусмотрено также автоматическое заполнение при помощи общего запроса, показанного в качестве примера. Пользователь может остановиться на этом запросе, если он его удовлетворяет, или изменить любую из перечисленных форм, генерируя новый запрос.

6. *Интерфейс с ориентацией на естественный язык.* Этот способ упрощения механизма запросов к БД предполагает разработку диалогового языка, который был бы как можно ближе к естественному.

Анализ использования реальных систем и общения с различными неподготовленными пользователями (биологи, медики, экологи и т. д.) позволяет сделать вывод, что пользователям нужен удобный для применения интерфейс, который было бы приятно использовать и который бы не требовал больших усилий для его освоения.

3.2.4. Проектирование экологических баз данных

Локальный мониторинг поверхностных вод. Первым этапом проектирования БД любого типа является анализ предметной области, который заканчивается построением информационной структуры (концептуальной схемы). На данном этапе анализируются запросы пользователей, выбираются информационные объекты и их характеристики и на основе проведенного анализа структурируется предметная область. Анализ предметной области является общезначимым этапом и не зависит от программной и технической среды, в которой будет реализовываться БД.

Требования пользователей к разрабатываемым БД представляют собой список запросов с указанием их интенсивности и объемов данных. Эти сведения разработчики БД получают в диалоге с ее будущими пользователями. Здесь же выясняются требования к вводу, обновлению и корректировке информации. Требования пользователей уточняются и дополняются при анализе имеющихся и перспективных приложений. Рассмотрим примерный состав вопросника в процессе анализа различных предметных областей.

Необходимо разработать БД учета результатов исследований поверхностных вод при проведении локального мониторинга.

Первая фаза анализа предметной области:

1. Сколько имеется точек отбора проб для проведения исследований?
2. Где они располагаются?
3. Какие параметры подлежат контролю?
4. Какова периодичность контроля?

Вторая фаза анализа предметной области состоит в выборе информационных объектов и заданий, необходимых свойств для каждого из них; выявлении связи между объектами; определении ограничений, накладываемых на информационные объекты, типы связей между ними, характеристики информационных блоков.

Проанализируем предметную область на примере БД «Локальный мониторинг». При выборе информационных объектов ответим на следующие вопросы:

1. На какие классы можно разбить данные, подлежащие хранению в БД?
2. Какое имя можно присвоить каждому классу данных БД?
3. Какие наиболее интересные характеристики (с точки зрения пользователя) каждого класса данных можно выделить?
4. Какие имена можно присвоить выбранным наборам характеристик?

Выявление информационных объектов – процесс итеративный. Он осуществляется на основании анализа информационных потоков и интервьюирования потребителей. Характеристики информационных объектов определяются теми же методами.

После беседы с различными пользователями, просмотра нормативно-технической и иной документации было выявлено, что интерес представляют три информационных объекта: точка отбора; количественное содержание в ней токсичных элементов; нормативно установленные эталонные содержания токсичных элементов.

Рассмотрим наиболее существенные характеристики каждого информационного объекта.

Точка отбора – координаты, природная среда.

Содержание токсичных элементов – точка отбора, дата отбора, кем осуществлен отбор проб, наименование исследуемого элемента, результаты испытаний.

Эталонное содержание – наименование элемента, нормативно-установленный количественный показатель, единица измерений, нормативный документ.

Далее выделяют связи между информационными объектами. В ходе этого процесса необходимо ответить на следующие вопросы:

1. Какие типы связей между информационными объектами?
2. Какое имя можно присвоить каждому типу связей?
3. Каковы возможные типы связей, которые могут быть использованы впоследствии?
4. Имеют ли смысл какие-либо комбинации типов связей?

Затем задаются ограничения на объекты, их характеристики и связи. При этом нужно ответить на следующие вопросы:

1. Какова область значения для числовых характеристик?
2. Каковы функциональные зависимости между характеристиками одного информационного объекта?
3. Какой тип отображения соответствует каждому типу связей?

Большинство БД, независимо от того, реализованы они на компьютерах или нет, для хранения данных используют таблицы. Каждая таблица состоит из столбцов и строк, которые в компьютерных БД называются полями и записями соответственно. Технология БД, ис-тория развития которой прошла ряд этапов и насчитывает более двух десятилетий, занимает одно из ведущих мест в прикладной инфор-матике.

Мониторинг природы в районе АЭС. Контролю подлежит поступление радиоактивных, химических и биологических веществ в окружающую среду. Мониторинг включает:

- экологическую инвентаризацию и паспортизацию источников загрязнений;
- исследование АЭС как источника поступления экологически значимых радионуклидов при разных режимах эксплуатации и различном состоянии активной зоны реактора;
- исследование других предприятий как источников поступления вредных химических веществ и радионуклидов в окружающую среду;
- изучение поступления биогенных соединений в водоем и реки;
- оценку степени эвтрофикации малых рек и водоемов;
- оценку размеров и возможного характера воздействия электромагнитного излучения на состояние региона;
- контроль загрязнения воздуха вредными химическими веществами на предприятиях и в городе.

В соответствии с современными экологическими концепциями контролю подлежит также площадь бассейна водосбора радиусом до

30 км, включающая водоем, и впадающие в него реки. Контролю и оценке подвергаются следующие факторы:

• антропогенный (содержание радионуклидов, нефтепродуктов, поверхностно-активных веществ, тяжелых металлов и других химических токсикантов в морской и речной воде);

• абиохимический (pH, параметры карбонатного равновесия, кислород, биогенные элементы, растворенное органическое вещество, соленость, температура);

• биотический (биологические сообщества фитопланктона, зоопланктона, рыб, бентоса, перифитона, водных растений, водных микроорганизмов).

Особое внимание уделяется совместному действию антропогенных факторов: радиоактивного, химического, теплового загрязнений, эвтрофикации, механического травмирования планктона и рыб на водозаборных устройствах. Значительная часть рыбы, обитающей в водоемах района содействия АЭС, используется в пищу, ее качество может существенно влиять на здоровье населения. Имеются данные о зараженности рыбы гельминтами. Состояние рыбных запасов должно особенно тщательно контролироваться, тем более что рыба является хорошим индикатором состояния водной среды.

Все данные о действующих факторах и параметрах вводятся в БД по водоему-охладителю, входящую в состав банка данных «Экология».

Отдельно выделена БД «Гидробионты» в связи с отмеченным выше значением объекта. Помимо данных, подробно отражающих развитие водоема на протяжении многих лет, она содержит ряд имитационных моделей, представляет исследователю уникальные возможности для изучения биологических закономерностей путем вычислительных экспериментов на компьютере, проверки гипотез и оценки реальных хозяйственных решений, например, мер по сохранению рыбных ресурсов.

Гидросфера представляет особый интерес для ядерной энергетики из-за дефицита воды в местах желательного размещения АЭС. Если добавить к этому то, что годовой объем поступления биогенных веществ в водоем-охладитель определяется деятельностью объекта энергетики, то ясна проблема оценки способности гидробионтов «держать» нагрузку. Экологам известно, что оценка состояния водоема, прогноза его развития (в частности, прогноза его способности выполнять функции водоема-охладителя) зависят от тонких процессов, сложны и требуют детального знания картины.

Контролю и оценке с вводом данных в банк подлежит ряд контрольных площадок и видов-индикаторов: «божьи коровки», грызуны, древесные и растительные виды (сосна, злаки). Дополнительно вводятся экспериментальные популяции культурных злаков (например, ячменя и др.) для определения их приспособленности к хроническому облу-

чению в условиях внутривидовой конкуренции (среди разных сортов), анализа появления морозов (ненаследственных изменений) колосьев, оценки возможного стимулирующего действия малых доз радиации. Последнее необходимо для исследования возможности создания экологических заповедников в районах расположения АЭС, подготовки рекомендаций по использованию природных ресурсов регионов АЭС в народном хозяйстве.

Как уже отмечалось, эволюция концепции взаимодействия человека с природой применительно к АЭС ведет к интенсификации работ по использованию низкопотенциального сбросного тепла в рамках энергобиологических комплексов для подогрева почв, полива, выращивания водорослей, рыбы, производства органического топлива (метана, водорода) из биомассы микроводорослей и водных растений. В связи с этим вопросы оценки влияния малых доз хронического облучения на эколого-генетические процессы в природных популяциях, изучения возможностей мутагенной активности видов, характерных для регионов АЭС, определения мутагенной активности абиотических компонентов (почвы, воды, донных отложений), изучения мутагенной активности видов – потенциальных накопителей радионуклидов, исследования мутагенной активности промысловых видов необходимо решать не просто как экологические, а в рамках анализа развития системы «станция – среда – человек».

Параметры контроля за здоровьем людей, проживающих рядом с АЭС:

1. Комплекс методов первичного иммунологического обследования позволяет получать основные показатели клеточного и гуморального иммунитета *(Т-, В-* и фагоцитарной систем). Модификация данного комплекса методов, разработанная в лаборатории клинической иммунологии Института иммунологии Минздрава СССР, требует минимальных затрат времени, реактивов, оборудования и, самое главное, минимального количества крови (0,2–0,5 мл), в связи с чем может применяться капиллярная кровь из пальца. Это впервые позволило внедрить метод в клиническую практику и провести обследование на основании этих методов большого количества людей. Апробация методов на сотрудниках Института атомной энергии имени И. В. Курчатова показала реальность такого обследования и позволила определить нормативные показатели у здоровых людей.

2. Комплекс показателей, получаемых в результате первичного иммунологического обследования населения (выборочных групп), сопоставляется с показателями здоровых людей в других регионах страны. Далее на основании полученной информации в обследованном контингенте можно произвести отбор лиц, имеющих общий синдром иммунологической недостаточности (ОСИН), т. е. определить людей

с напряженным состоянием иммунной системы, имеющих повышенный риск к возникновению рецидивирующих инфекционных заболеваний.

Поскольку среди здоровых людей количество лиц, имеющих ОСИН, невелико, целесообразно обследовать не менее 300 человек. В день можно обследовать до 100 человек.

Другим специфическим для АЭС дополнением системы экологического мониторинга является мониторинг генетического состояния на основе контроля динамики уровня врожденных пороков развития (ВПР). Хотя данных о влиянии АЭС нет, острота вопроса требует развертывания вокруг АЭС такого контроля даже в целях пропаганды.

Изменения в окружающей человека среде могут выразиться в увеличении частоты врожденных пороков развития, росте наследственной патологии, изменении предрасположенности к ряду заболеваний экзогенной и эндогенной природы, что должно сказаться на жизнеспособности и репродуктивной функции. В связи с этим проблема генетического мониторинга не должна сводиться только к использованию экспериментальных модельных систем, так как между моделями и организмом человека лежит малоизученный путь экстраполяции. Сама человеческая популяция должна стать объектом исследования, а показатели здоровья отдельных групп населения – показателем неблагоприятного воздействия на человека факторов среды. В качестве одной из групп таких показателей могут быть рассмотрены ВПР. Интерес к группе новорожденных с ВПР обусловлен высоким удельным весом в популяции, их корреляцией с хромосомными аномалиями, значительной связью с генными мутациями. Следует отметить, что значение ВПР не ограничивается задачами генетического мониторинга. Контроль за данными мутационного процесса в конечном счете сводится к оценке роли средовых факторов, которые возрастают значительными темпами. Поэтому сами по себе показатели частоты рождений с ВПР могут явиться индикаторами таких воздействий.

ВПР, как и другие демографические показатели (внутриутробные потери, детская смертность, частота двоен и близнецов), все еще остаются недостаточно изученными. Из-за отсутствия стандартизации методов регистрации и учета трудно судить о популяционно-географической и временной вариабельности в частоте появления ВПР. Что касается родовспомогательных и детских учреждений, то, согласно существующей системе регистрации в них случаев с ВПР, не представляется возможным вести учет данных, которые бы отвечали требованиям генетического мониторинга. В связи с этим одна из целей мониторинга человека – создание системы генетического мониторинга с использованием учета ВПР. Для этого необходимо создать унифицированные карты для регистрации нормальных родов, спонтанных

внутриутробных потерь, мертворождений, близнецов, двоен и случаев с ВПР при одновременном учете возрастных и социальных показателей родителей. Имеется положительный трехлетний опыт решения задачи по созданию базы данных по ВПР для Ленинградской АЭС имени В. И. Ленина.

3.2.5. Глобальная информационная база данных о природных ресурсах

С 1985 г. в рамках Департамента ЮНЕП по проблемам экологической информации и оценок состояния окружающей среды функционирует Глобальная информационная база данных о природных ресурсах (ГРИД, GRID – Global Resource Information Database) (http://www.grid.unep.ch/).

Программа ГРИД создана как информационная служба, обеспечивающая экологическими данными управленческие службы и специальные агентства ООН, международные организации и правительства.

ГРИД представляет собой глобальную сеть связанных между собой центров, осуществляющих доступ заинтересованных пользователей к экологической информации с целью обоснования управленческих решений в экономике и политике.

В мире действует несколько центров программы ГРИД: в США, Канаде, Новой Зеландии, Дании, Норвегии, Непале, Бразилии, Таиланде, Кении, Польше, Венгрии, Швейцарии, России. Их деятельность координируется центром ГРИД-Найроби (Кения), расположенным в штабквартире ЮНЕП.

Основные цели программы – оценка состояния окружающей среды и анализ данных о состоянии окружающей среды. Важная долговременная цель программы ГРИД – обеспечение доступа ко всем существующим экологическим данным. В связи с этим ГРИД имеет компьютерный каталог метабазы данных в помощь пользователям для указания местонахождения и приобретения необходимых данных. Метабаза данных содержит полное описание информационных ресурсов (данных), имеющихся в ГРИД-центрах всего мира: цифровые и бумажные карты, спутниковые изображения, табличные и статистические данные. Она в конечном счете будет содержать детальные описания данных, имеющихся в других архивах, с указанием организации, которая готова «поделиться» необходимой информацией. Обеспечение пользователей экологическими данными через доступную директорию данных о ресурсах, которая существует в ГРИД, и помощь в приобретении этих данных – одна из основных задач ГРИД и главное требование Повестки дня на XXI век.

Список литературы

1. *Гершензон, В. Е.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания: учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / В. Е. Гершензон, Е. В. Смирнова, В. В. Элиас; под ред. В. Е. Гершензона. – М.: Академия, 2003. – 288 с.
2. http:/www.grid.ecoinfo.ru/wtbint/start.htm.

3.3. Географические информационные системы

Эволюция географических информационных систем. Географические информационные системы (ГИС) – это возможность нового взгляда на окружающий нас мир с помощью современной компьютерной технологии для картирования и анализа объектов реального мира, а также событий, происходящих на нашей планете. Эта технология объединяет традиционные операции работы с базами данных, такими как запрос и статистический анализ, с преимуществами полноценной визуализации и географического (пространственного) анализа, которые предоставляет карта. Эти возможности отличают ГИС от других информационных систем и обеспечивают уникальные возможности для ее применения в широком спектре задач, связанных с анализом и прогнозом явлений и событий окружающего мира, с осмыслением и выделением главных факторов и причин, а также их возможных последствий, с планированием стратегических решений и текущих последствий предпринимаемых действий.

Понятие географической информационной системы сформировалось еще до появления компьютеров. Ранние ГИС использовали нарисованные от руки и накладываемые друг на друга слои из прозрачного материала (кальки), которые содержали информацию о почвах, рельефе и растительности. Разглядывая их на просвет, ландшафтные архитекторы и градостроители могли принимать обоснованные решения о наилучших местах для размещения новых сооружений, учитывая практические потребности и параметры окружающей среды. В начале 1960-х гг. разработанные в Гарвардском университете и Массачусетском технологическом институте (США) универсальные компьютеры и программное обеспечение сформировали основу для автоматизированной обработки географической информации.

Первая реально работающая ГИС появилась в Канаде в начале 1960-х гг. ГИС развивались на базе информационно-поисковых систем, а позднее – картографических банков данных. Информационные системы рассматривались как первый этап автоматизированного создания карт, затем в функции стали включать блоки математико-картографического моделирования и автоматизированного воспроизведения карт. Большинство ГИС и сейчас включают в свои задачи создание карт или

используют картографические материалы как источник базовой информации.

Понятие «географическая информационная система» комплексное и со временем сильно меняется. Приведем одно из его определений: географическая информационная система – система технических средств, программного обеспечения и процедур, предназначенная для сбора пространственных данных, управления и манипулирования ими, для анализа, моделирования и отображения в целях решения комплекса задач по планированию и управлению.

Научным обоснованием, проектированием, созданием и использованием ГИС, разработкой геоинформационных технологий и прикладными аспектам или приложениями ГИС для практических или научных целей занимается геоинформатика. В ее задачи входят как научные и технологические разработки, так и производственная деятельность.

Основные задачи, которые решаются с помощью ГИС:

- ведение комплексного и отраслевого кадастра;
- поиск и рациональное использование природных ресурсов;
- мониторинг экологических ситуаций;
- контроль условий жизни населения (здравоохранение, социальное обслуживание);
- картографирование – создание тематических карт, национальных и региональных атласов, обновление карт;
- территориальное и отраслевое планирование и управление промышленностью, сельским хозяйством, транспортом, энергетикой и т. д.

Существуют различные классификации ГИС, например, по территориальному охвату (общенациональные и региональные), по целям (многоцелевые, специализированные, в том числе информационно-справочные, инвентаризационные, для нужд планирования, управления), по тематической ориентации (общегеографические, отраслевые, в том числе водных ресурсов, использования земель, лесопользования, рекреации и др.).

Функциональные возможности ГИС:

- ввод данных в машинную среду путем импорта из существующих наборов цифровых данных или с помощью оцифровки источников данных;
- преобразование данных, включая их конвертирование из одного формата в другой, трансформацию картографических проекций, изменение систем координат;
- хранение, манипулирование и управление данными во внутренних и внешних базах данных;
- картометрические операции;
- средства персональных настроек пользователей.

Следует заметить, что ГИС – это не инструмент для выдачи решений, а средство, помогающее ускорить и повысить эффективность процедуры принятия решений, обеспечивающее ответы на запросы и функции анализа пространственных данных, представления результатов анализа в наглядном и удобном для восприятия виде. ГИС помогает, например, в решении таких задач, как предоставление разнообразной информации по запросам органов планирования, разрешение территориальных конфликтов, выбор оптимальных (с разных точек зрения и по разным критериям) мест для размещения объектов и т. д. Требуемая для принятия решений информация может быть представлена в лаконичной картографической форме с дополнительными текстовыми пояснениями, графиками и диаграммами. Можно достаточно быстро рассмотреть несколько вариантов решения и выбрать наиболее эффективный.

Ключевые составляющие ГИС. Работающая ГИС включает в себя пять составляющих: аппаратные средства, программное обеспечение, данные, исполнителей и методы.

Аппаратные средства – это компьютер, на котором работает ГИС. В настоящее время ГИС работают на различных типах компьютерных платформ – от персональных компьютеров до централизованных серверов.

Программное обеспечение ГИС содержит функции и инструменты, необходимые для хранения, анализа и визуализации географической (пространственной) информации. Ключевые компоненты программных продуктов:

- инструменты для ввода и оперирования географической информацией;
- система управления базой данных;
- инструменты поддержки пространственных запросов, анализа и визуализации (отображения);
- графические пользовательские программы для легкого доступа к инструментам.

Данные (информационное обеспечение). Данные о пространственном положении (географические данные) и связанные с ними табличные данные могут собираться и подготавливаться самим пользователем либо приобретаться. В процессе управления пространственными данными ГИС интегрирует пространственные данные с другими типами и источниками данных, а также может использовать СУБД, применяемые многими организациями для упорядочивания и поддержки имеющихся в их распоряжении данных. Часто используются геодезические, кадастровые данные, материалы дистанционного зондирования, текстовые данные и т. д.

Исполнители. Пользователями ГИС могут быть как технические специалисты, разрабатывающие и поддерживающие систему, так и конечные пользователи, которым ГИС помогает решать различные задачи.

Методы. Методы работы ГИС и эффективность их применения во многом зависят от правильно составленного плана и правил работы, которые обусловлены спецификой решаемых задач.

ГИС-моделирование. Это создание многослойной электронной карты, в которой опорный слой описывает географию определенной территории, а каждый из остальных слоев – один из аспектов состояния этой территории. Выявление взаимосвязей, прогнозирование, оценка объектов и явлений осуществляются на основе различного сочетания и сопряженного анализа этих слоев.

ГИС хранит информацию о реальном мире в виде набора тематических слоев, которые объединены на основе географического положения. Этот простой, но очень гибкий подход доказал свою ценность при решении разнообразных реальных задач: при отслеживании передвижения транспортных средств и материалов, детальном отображении реальной обстановки и планируемых мероприятий, моделировании глобальной циркуляции атмосферы.

Слой – совокупность однотипных пространственных объектов, относящихся к одной теме или классу объектов в пределах некоторой территории и в системе координат, общих для набора слоев.

Данные, встречающиеся на карте, представляют собой связанные объекты. Каждый объект может быть описан одним или несколькими геометрическими примитивами и атрибутами. К геометрическим примитивам относятся прежде всего точки, линии и площади. Атрибуты – это числовые или символьные характеристики, содержащиеся в базе данных, они могут относиться как к самим примитивам, так и к объектам.

Совокупность примитивов и атрибутов образует простой объект. Совокупность простых объектов образует сложный, или составной, объект. Все объекты и примитивы должны иметь свой номер или идентификатор, при помощи которого к графической информации можно привязать тематическую.

Любая географическая информация содержит сведения о пространственном положении, будь то привязка к географическим или другим координатам, ссылки на адрес, почтовый индекс, избирательный округ или округ переписи населения, идентификатор земельного или лесного участка, название дороги и т. п. При использовании подобных ссылок для автоматического определения местоположения объектов применяется процедура под названием *геокодирование.* С ее помощью мож-

но быстро определить и посмотреть на карте, где находится интересующий вас объект или явление.

Преобразование данных в ГИС. ГИС может работать с двумя существенно различающимися типами данных – векторными и растровыми. В векторной модели информация о точках, линиях и полигонах кодируется и хранится в виде набора координат *X, Y.* Местоположение точки (точечного объекта), например, буровой скважины, описывается парой координат *(X, Y)*. Линейные объекты, такие как дороги, реки или трубопроводы, сохраняются как наборы координат *X, Y.* Полигональные объекты типа речных водосборов, земельных участков или областей обслуживания хранятся в виде замкнутого набора координат. Векторная модель особенно удобна для описания дискретных объектов и меньше подходит для описания непрерывно меняющихся свойств, таких как типы почв или доступность объектов. Растровая модель оптимальна для работы с непрерывными свойствами. Растровое изображение представляет собой набор значений для отдельных элементарных составляющих (ячеек), оно подобно отсканированной карте или картинке. Обе модели имеют свои преимущества и недостатки. Современные ГИС могут работать как с векторными, так и с растровыми моделями.

ГИС обычно выполняет с данными пять процедур: ввод, манипулирование, управление, запрос и анализ, визуализацию.

Ввод. Для использования в ГИС данные должны быть преобразованы в подходящий цифровой формат. Процесс преобразования данных с бумажных носителей в компьютерные файлы называется оцифровкой. В современных ГИС этот процесс может быть автоматизирован с применением сканерной технологии, что особенно важно при выполнении крупных проектов, либо, при небольшом объеме работ, данные можно вводить с помощью диджитайзера. Многие данные уже переведены в форматы, напрямую воспринимаемые ГИС-пакетами.

Манипулирование. Часто для выполнения конкретного проекта имеющиеся данные нужно дополнительно видоизменить в соответствии с требованиями определенной системы. Например, географическая информация может быть в разных масштабах (осевые линии улиц – в масштабе 1:100 000, границы округов переписи населения – в масштабе 1:50 000, а жилые объекты – в масштабе 1:10 000). Для совместной обработки и визуализации все данные удобнее представить в едином масштабе. ГИС-технология предоставляет разные способы манипулирования пространственными данными и выделения данных, нужных для конкретной задачи.

Управление. В небольших проектах географическая информация может храниться в виде обычных файлов. Но при увеличении объема информации и росте числа пользователей для хранения, структурирования и управления данными эффективнее применять системы

управления базами данных. В ГИС наиболее удобно использовать реляционную структуру, при которой данные хранятся в табличной форме.

Запрос и анализ. В ГИС можно получать ответы как на простые вопросы (Кто владелец данного земельного участка? На каком расстоянии друг от друга расположены эти объекты? Где расположена данная промзона?), так и на более сложные, требующие дополнительного анализа (Где есть места для строительства нового дома? Каков основной тип почв под еловыми лесами? Как повлияет на движение транспорта строительство новой дороги?). С помощью ГИС можно выявлять и задавать шаблоны для поиска, проигрывать сценарии по типу «что будет, если».

Современные ГИС имеют множество мощных инструментов для анализа. Среди них наиболее значимы два: анализ близости и анализ наложения. Для проведения анализа близости объектов друг относительно друга в ГИС применяется процесс *буферизации,* который помогает ответить на вопросы типа: Сколько домов находится в пределах 100 м от этого водоема? Сколько покупателей живет не далее 1 км от данного магазина? Какова доля добытой нефти из скважин, находящихся в пределах 10 км от здания руководства данного Нефтегазодобывающего управления? Процесс наложения включает интеграцию данных, расположенных в разных тематических слоях. В простейшем случае – это операция отображения, но при ряде аналитических операций данные из разных слоев объединяются физически. Наложение, или пространственное объединение, позволяет, например, интегрировать данные о почвах, уклоне, растительности и землевладении со ставками земельного налога.

Визуализация. Для многих типов пространственных операций конечным результатом служит представление данных в виде карты. Это очень эффективный и информативный способ хранения, представления и передачи географической (имеющей пространственную привязку) информации. С помощью ГИС визуализация самих карт может быть легко дополнена отчетными документами, трехмерными изображениями, графиками и таблицами, фотографиями и другими средствами (например, мультимедийными).

Список литературы

1. Введение в экологическое моделирование / А. А. Цхай [и др.]. – Барнаул: Азбука, 2001. – 315 с.

2. *Гершензон, В. Е.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания: учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / В. Е. Гершензон, Е. В. Смирнова, В. В. Элиас; под ред. В. Е. Гершензона. – М.: Академия, 2003. – 288 с.

3. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии: учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2000. – 396 с.

3.4. Использование информационных технологий в управлении качеством окружающей среды

3.4.1. ГИС в управлении качеством окружающей среды

Существует большое количество ГИС. Среди них:

ArcView CIS, PC ARC/INFO и *DAK (Data Automation Kit)* компании ESRI. Распространением в России и других странах СНГ геоинформационных технологий ESRI занимается компания ДАТА+. ArcView GIS выполнена в виде стандартного приложения Windows (работает также на платформах UNIX и в ряде версий Macintosh). Может использоваться в различных сферах деятельности для визуализации, запроса и анализа любой пространственной информации. ArcView GIS объединяет векторные, растровые, табличные данные в единую аналитическую систему. PC ARC/INFO предоставляет полный набор средств и функций для управления, анализа, отображения и картирования географической информации на персональном компьютере. DAK представляет специализированную программу для ввода новой и обновления имеющейся цифровой информации.

Map Info компании Map lnfo Corporation. Распространением этой полнофункциональной ГИС занимается компания ЭСТИ МАП.

GeoDraw/ГеоГраф – этот векторный редактор разработан в Центре геоинформационных исследования Института географии РАН.

Рассмотрим некоторые примеры использования разных ГИС в управлении качеством окружающей среды.

Развитие визуальной интерпретации многомерных данных и ГИС-технологий связано, в частности, с тем, что человеку с его ограниченным трехмерным пространственным воображением сложно, а в большинстве случаев невозможно анализировать и давать обобщенные оценки многомерным объектам. Одним из первых опытов комплексного анализа пространственно распределенной информации стали поэтапные работы Института экологии Волжского бассейна РАН на примере данных о состоянии экосистем г. Тольятти, Самарской области и всего Волжского бассейна, выполняемые с 1989 г. [7; 8; 11–13; 20].

Пространственно распределенная информация ЭИС «REGION-VOLGABAS» охватывала следующий рубрикатор природных компонент:

• климат территории Волжского бассейна (особенности распределения температуры воздуха и количества осадков, а также ветрового режима);

• географо-геологическое описание (орография, дочетвертичный и четвертичный периоды развития региона, основные черты тектоники) и геохимическая обстановка;

• почвы и ландшафты Волжского бассейна, наличие особо охраняемых природных территорий;

• лесные ресурсы и распределение естественной растительности;

• животный мир Волжского бассейна (видовое распределение и фаунистические комплексы наземных позвоночных и птиц);

• население (демографическая ситуация в Волжском бассейне и степень урбанизации территории);

• гидрология и гидрохимическое качество вод реки Волги и ее водохранилищ;

• гидробиоценозы и их компоненты (фитопланктон, зообентос, водяные клещи, инфузории, микроскопические водные грибы, рыбные запасы бассейна Волги);

• оценки качества воды и степени эвтрофикации Волжских водохранилищ по видам-биоиндикаторам.

Обширные рубрики накопленных данных детально описывали распределение по территории техногенной нагрузки и антропогенных воздействий, в том числе:

• загрязнение воздушного и водного бассейна;

• распределение отходов производства и коммунального хозяйства (включая особо опасные вещества для состояния экосистем и здоровья человека);

• радиационная обстановка, места техногенных аварий и природных катастроф;

• транспортная и рекреационная нагрузка;

• сельскохозяйственная нагрузка (включая распределение по территории бассейна минеральных удобрений, распаханности территории, животноводческой и пестицидной нагрузок).

Состояние здоровья населения как критерий оценки качества среды в рамках ЭИС «REGION-VOLGABAS» включало следующие параметры:

• общая заболеваемость взрослого населения (смертность, естественный прирост населения, оценки заболеваемости от «экологически обусловленных» нозологий);

• здоровье матери и ребенка (рождаемость, смертность детей до года, общая заболеваемость детей, в том числе от экологически обусловленных нозологий);

• инфекционные и паразитарные болезни, частота злокачественных новообразований;

• общее состояние системы здравоохранения.

Наличие перечисленных данных и алгоритмов их обработки дало возможность решать задачи комплексного анализа состояния экосистем региона, оценивать характер совокупной антропогенной нагрузки, с помощью модельных сценариев осуществлять прогноз развития экологи-

ческой обстановки и на этой основе предложить ряд рекомендаций по направлениям устойчивого эколого-экономического развития и социально-экологической реабилитации территорий. Работы по Самарской области и программе «Возрождение Волги» были отмечены первой премией Минэкологии СССР в 1991 г.

Справочно-информационная система «Атлас окружающей среды Белого моря» создана на базе ГИС-технологий для получения комплексной пространственно-привязанной экологической информации о Белом море на основе среднемноголетних наблюдений и результатов экологического мониторинга. Атлас состоит из шести основных разделов: «Регион», «Белое море», «Условия среды», «Биология моря», «Антропогенное воздействие» и «Экология».

С помощью ГИС (в частности, используя программу *ERDAS IMAGINE*) можно определить районы, в которых существует высокий риск наводнений, с целью предупреждения или уменьшения возможных разрушений и принятия защитных мер.

В Москве с использованием ГИС-технологий (*ARC/INFO, ArcView GIS* и *ArcExplorer*) на основе нормативно-правовых, методических, аналитических и картографических материалов разработана единая информационная система природного комплекса центральной части города. Система предназначена для инвентаризации зеленых насаждений, паспортизации озелененных территорий и поддержки принятия решений по регулированию хозяйственного использования и строительства в центральной части Москвы, которое призвано обеспечить сохранение, восстановление и развитие природных компонентов городской среды.

В рамках многолетней федеральной целевой программы «Мировой океан» создана единая система информации ЕСИМО, которая базируется на современных информационных технологиях (СУБД, ГИС, телекоммуникации и др.) и использовании распределенных БД. Информацию (такую как маршруты научно-исследовательских судов, размещение гидролого-гидрохимических станций, буев и измерительных комплексов, пространственное распределение гидрофизических параметров на поверхности и в глубинах морей и океанов и т. п.) удобно представлять в виде карт, что предопределило широкое использование в системе ГИС-технологий. С их помощью в системе создаются карты разливов рек и водоемов, зон затопления территорий, обзорные карты ледовой обстановки по морям, карты гидрометеорологических условий, схем течений, характеристик приливных и суммарных течений на поверхности и в глубинах, концентрации гидрохимических, биогенных и микробиологических соединений, содержания загрязняющих веществ в воде и др.

Интересен опыт геоинформационной поддержки системы биологического мониторинга городской территории, внедренной лабораторией

биоиндикации Калужского государственного педагогического университета имени К. Э. Циолковского. Для этой цели разработаны оригинальные алгоритмы и методы площадной оценки и районирования территорий на основе картографической программы MapInfo Professional 4.5, относящейся к классу профессиональных ГИС. Информация формируется в виде различных вариантов карт экологической обстановки:

- подробная информация по каждой точке территории;
- районирование для укрупненных управленческих решений;
- оценка деформаций от конкретных источников воздействия [15; 16].

В настоящее время в Республике Беларусь функционирует геопортал земельно-информационной системы – интернет-ресурс, который обеспечивает доступ к множеству информационных ресурсов с инструментами просмотра, поиска геопространственной информации, ее визуализации, загрузки, распространения и поиска геосервисов (сайт системы – http://gismap.by). Он предназначен для поддержки принятия решений по организации эффективной работы в области землеустройства, геодезии, картографии, земельного, лесного кадастра и кадастра недвижимости, градостроительства и архитектуры, телекоммуникаций, обслуживания трубопроводов, добычи и транспортировки нефти и газа, электрических сетей, экологии и природопользования, геологии и геофизики, железнодорожного и автомобильного транспорта, банковского дела, образования, государственного управления за счет автоматизации обработки геопространственных данных на основе современных ГИС-технологий.

На сайте www.belinvestles.by доступна геоинформационная система «Лесные ресурсы» на базе formap 5.3. Это специализированная система для предприятий лесного хозяйства Республики Беларусь, предназначенная для обнаружения лесных пожаров, выделения лесосек и др.

3.4.2. Экспертные методы оценки экологических воздействий

По инициативе Программы ООН по окружающей среде (UNEP) для процесса экологической оценки был разработан ряд стандартизованных методов или вспомогательных инструментов, призванных повысить эффективность выявления воздействий. Использование этих методов позволяет упорядочить и систематизировать процесс биоиндикации и мониторинга, избегая многих ошибок, которые совершались на ранних этапах развития.

Австралийское агентство по охране окружающей среды AEAA, а также международная группа специалистов выделяют следующие стандартизованные методы, используемые для выявления воздействий:

контрольные списки; матрицы; сети; наложение карт и географические информационные системы; экспертные системы.

Контрольные списки, как правило, разрабатываются на основе списков компонентов окружающей среды или воздействующих факторов, которые должны быть исследованы для выявления возможных воздействий. Списки могут варьироваться по сложности и назначению от очень простого списка до больших иерархических рубрикаторов, которые также подразумевают оценку значимости путем экспертного нормирования и взвешивания. Примерами таких списков являются известная система сапробности индикаторных организмов Кольквитца – Марссона в модификации В. Сладечека [22] или таблица обобщенных характеристик изменений в водных и наземных системах р. Чапаевки, содержащая оценки индикаторной способности различных компонент и параметров экосистемы [19]. Во втором примере на практике показано, как эффективность выводов биоиндикации может быть существенно повышена за счет сопряженного использования различных индикаторов.

Списки могут быть улучшены и адаптированы к местным условиям по мере накопления опыта их использования. Контрольные списки неэффективны для выявления непрямых воздействий (вторичных и более высокого порядка), а также взаимодействия между воздействиями.

Матрицы представляют собой таблицы, которые могут использоваться, чтобы определить взаимодействие между группами действующих факторов и компонентами (характеристиками) окружающей среды. При использовании матрицы взаимодействие между конкретным возмущением и компонентом окружающей среды может быть отмечено в клетке на пересечении рядов и столбцов. В клетках могут быть сделаны примечания, чтобы подчеркнуть существенность воздействия или другие особенности, связанные с природой факторов, например:

- значки или символы могут наглядно определить тип воздействия (такие как прямой, косвенный, совокупный);
- цифры или размер значков могут указывать масштаб;
- могут быть сделаны описательные замечания.

Существует матрица взаимодействий Леопольда, применимая для экспертизы большинства экологических проектов, которая содержит 88 всесторонних компонентов и характеристик окружающей среды, представленных столбцами таблицы, и 100 видов деятельности (воздействующих факторов), которые представлены строками. Общий подход, использованный в матрице Леопольда, получил широкое распространение, на его основе было разработано множество других матриц.

Другим примером матрицы является таблица общих критериальных характеристик [10], содержащая в строках качественные признаки модификаций биоценозов зообентоса, а в столбцах – различные инва-

риантные состояния, соответствующие прогрессу или регрессу соответственно в экологической структуре сообществ и в процессах метаболизма. В общем случае в матрицах также трудно различать прямые и косвенные воздействия.

Сети представляют собой графы причинно-следственных отношений и иллюстрируют множественные связи между антропогенными факторами, природоохранной деятельностью и компонентами (характеристиками) окружающей среды и поэтому особенно полезны для выявления и отображения воздействий второго порядка (косвенные, синергетические и т. д.). Упрощенные сети могут использоваться в сочетании с другими методами для обеспечения того, чтобы важнейшие воздействия второго порядка не были пропущены при исследовании. Можно привести пример сети, отражающей взаимосвязи, приводящие к изменению качества жизни, состояния дикой природы и прочих условий в случае реализации мероприятий по развитию туризма в Замбии. Разработка более детальных сетей может потребовать значительного времени и усилий, особенно если для этого не используются компьютерные программы.

Наложение карт и географические информационные системы – послойно накладываемые карты или компьютерные изображения, которые могут использоваться для визуализации воздействий. ГИС делят карту района на отдельные ячейки и хранят большой объем информации для каждой ячейки. Такие системы могут использоваться для целей анализа и компьютерного моделирования.

Экспертные системы (ЭС) – как правило, это компьютеризованные системы принятия решений, основанные на знаниях. Внешне работа ЭС проста: пользователю последовательно предлагаются вопросы, сформулированные на основе имеющейся базы классифицированных фактов и заложенного в системе механизма поиска взаимосвязей между ними. ЭС анализирует ответ на каждый вопрос и переходит к следующему вопросу, учитывая данный ответ.

ЭС возникли как первый практический результат развития алгоритмов искусственного интеллекта – совокупности научных дисциплин, изучающих методы решения задач интеллектуального (творческого) характера с использованием компьютеров [9; 14]. ЭС выполняет функции эксперта при решении задач из некоторой предметной области и состоит из следующих компонентов [17]:

- базы знаний (части системы, в которой содержатся факты);
- подсистемы генерации «умозаключений» (множества правил, по которым осуществляется решение задачи);
- подсистемы объяснения;
- подсистемы приобретения знаний;
- диалогового процессора.

Основными отличиями ЭС от других программных продуктов являются использование не только данных, но и знаний, а также специального механизма синтеза решений и новых знаний на основе имеющихся. Знания в ЭС представляются в такой форме, которая может быть легко обработана на компьютере. Наиболее распространенный способ представления знаний в экспертных системах – непротиворечивые логические высказывания [3] или продукционные правила. В таких системах предметная область описывается с помощью логических рассуждений, ведущих от причин к следствию, т. е. устанавливается некоторая детерминированная причинно-следственная связь между фактором А и явлением В.

Качество ЭС определяется размером и качеством базы знаний (правил или эвристик). Для ее построения требуется провести опрос специалистов, являющихся экспертами в конкретной предметной области, а затем систематизировать, организовать и снабдить эти знания указателями, чтобы впоследствии их можно было легко извлечь из базы. Обычно в любой момент времени в системе существуют три типа знаний:

• структурированные – статические знания о предметной области (выявленные знания не изменяются);

• структурированные динамические – изменяемые знания о предметной области (обновляются по мере выявления новой информации);

• рабочие – знания, применяемые для решения конкретной задачи или проведения консультации.

В ЭС обычно заранее не определен алгоритм задачи, который строится по ходу ее решения на основании эвристических правил, поэтому обработка знаний часто может приводить к получению такого результата, который трудно предусмотреть. Одним из важных вопросов, возникающих при проектировании управляющей компоненты систем, основанных на знаниях, является выбор метода поиска решения, т. е. стратегии синтеза умозаключений [4; 21]. От выбранного метода поиска (направления и способа его осуществления) будет зависеть порядок применения и срабатывания правил.

Считается, что ЭС имеют определенные преимущества перед человеком-экспертом:

• у них нет предубеждений и они не делают поспешных выводов;

• работают систематизировано, рассматривая все детали, часто выбирая наилучшую альтернативу из всех возможных;

• могут быть очень большими;

• будучи введены в машину один раз, знания сохраняются навсегда, человек же имеет ограниченную базу знаний, и если данные долгое время не используются, то они забываются и навсегда теряются;

• по своей природе устойчивы к помехам, в то время как эксперт пользуется побочными знаниями и легко поддается влиянию

внешних факторов, которые непосредственно не связаны с решаемой задачей;

• не обременены сведениями из других областей и менее подвержены «шумам»;

• не заменяют специалиста, а являются инструментом в его руках.

Разумеется, имеется ряд предметных областей и прикладных задач, где разработка или использование ЭС не всегда обоснованы. В таблице 13 приведены сравнительные критерии, по наличию которых можно судить о целесообразности применения ЭС. В целом ЭС является не подменой, а разумным дополнением традиционным математическим задачам, решаемым обычным путем формальных преобразований, процедурного анализа или численными методами.

Таблица 13

Критерии применимости экспертных систем при решении прикладных задач

Применение ЭС обосновано	Применение ЭС не обосновано
Не могут быть построены строгие алгоритмы или процедуры, но существуют эвристические методы решения	Имеются эффективные алгоритмические методы
Есть эксперты, которые способны решить задачу	Отсутствуют эксперты или их число недостаточно
По своему характеру задачи относятся к области диагностики, интерпретации или прогнозирования	Задачи носят вычислительный характер
Доступные данные «зашумлены»	Известны точные факты и строгие процедуры
Задачи решаются методом формальных рассуждений	Задачи решаются процедурными методами, с помощью аналогии или интуитивно
Знания статичны (неизменны)	Знания динамичны (меняются со временем)

В качестве классического примера ЭС экологического профиля можно привести систему PLANT/cd, предсказывающую потери зерна из-за черной совки [18]. Эта ЭС реализует прогноз состояния конкретного агроучастка по результатам обследования. При этом используются такие показатели, как количество попавших в ловушку бабочек, прополка поля, возрастной спектр личинок, состояние почвы, сорт зерновой культуры и проч.

Примером экспертных систем в области биоиндикации является проект, осуществленный в Интернете Ярославским областным центром дистанционного обучения школьников [1]. Здесь можно самостоятельно

без каких-либо финансовых затрат выполнить качественный анализ состояния воды по гидробиологической пробе (автор – школьник Сергей Юров). Для этого необходимо просто ввести данные о встречаемости по 24 группам водных организмов и получить описание типа и характеристик прогнозируемого водоема.

3.4.3. Экспертные системы в экологии

Характерной особенностью процесса принятия решения в области экологии является участие в нем представителей разных дисциплин. Собственно экологический анализ ведется биологами, но в выборе вариантов действий решающая роль принадлежит инженерам, экономистам, очень важны также медицинские и социальные аспекты оценок. Трудность выбора решения определяется необходимостью оценки информации с точки зрения представителей разных специальностей. Привлекать для анализа экологических аспектов решений квалифицированного эколога не всегда возможно и целесообразно. Необходимо повышать экологическую культуру специалистов, но вряд ли это возможно делать до уровня профессиональной оценки решения.

Наиболее реальный путь экологизации решений – постепенное внедрение экспертных экологических систем. Руководитель, инженер, проектировщик, технолог должны получать из информационных ресурсов не только данные, но и экологические знания, необходимые для верной оценки данных.

В системе экологического контроля и оценки между пользователем и банком данных должна находиться ЭС, позволяющая инициировать диалог только в случае действительной необходимости. Она осуществляет контроль исходных данных проверкой совпадений значений одинаковых параметров в различных формах, правильности балансов, соблюдения тождеств и т. д. Более важен неформальный контроль, в частности оценка правдоподобности, с использованием специальных статистических программ. Но главное назначение ЭС – анализ каждого конкретного значения в контексте имеющихся у нее данных (включая справочное) и знаний (взаимоотношений между данными). Разумеется, знания имеются у экспертов, а ЭС – это аккумулятор, представляющий знания в явном либо неявном виде. Экологические проблемы разноплановы, что требует привлечения к анализу многих специалистов из разных областей. Это сложно, отсюда ошибки в связи с «выпадением» важных аспектов. Поэтому создание ЭС именно в этой области особенно эффективно.

ЭС можно обобщенно определить как систему, способную эффективно заменить человека-эксперта в данной предметной области, т. е. осуществлять консультативные функции. При этом система использу-

ет знания, полученные ранее от высококвалифицированных экспертов. Во многих случаях эти знания могут быть представлены в виде набора элементарных правил, чаще всего продукционного типа («если – то»), которыми пользуются эксперты при решении той или иной задачи. Эти правила образуют базу знаний ЭС. Используя механизм логического вывода, ЭС строит из этих правил и фактов логические цепочки, образующие решение конкретной задачи. И если первоначально основные надежды возлагались на механизм логического вывода, то затем опыт эксплуатации реальных систем показал, что их успех или неуспех определяется скорее широтой базы знаний, способностью извлечь их из эксперта.

Как правило, поиск решения ведется в ходе диалога на подмножестве естественного языка, ориентированного на пользователя-непрограммиста. Отличительной особенностью ЭС является наличие механизма объяснения логики принятия решения, позволяющего системе обосновывать свое решение или вопрос. Объяснения могут быть в форме:

• заранее заготовленных объяснений (например, сообщение об ошибке);

• релятивных объяснений (каждый шаг программы снабжается пояснением о том, что в данном случае она делает и с какой целью); затем по ассоциативному дереву строится объяснение метода решения проблемы;

• сообщений специальной объясняющей программы, которая контролирует действия системы и в случае необходимости выдает пояснения пользователю.

3.4.4. Банк данных социально-гигиенического мониторинга

Состояние человека является эффективной оценкой для состояния среды. И хотя проблема интегральной оценки состояния здоровья разработана лучше, чем проблема интегральной оценки состояния среды, до ее решения еще далеко.

Основной способ оценки здоровья, применяемый сегодня, основан на его оценке через заболеваемость. Этот способ может и должен использоваться в системах экологического контроля и оценки. В банк данных по экологии человека следует включать базы данных по заболеваемости, так как многие болезни являются хорошим индикатором неблагополучия среды по отдельным факторам либо по группам факторов. Например, биологическое загрязнение воды проявляется через инфекционные и желудочно-кишечные заболевания, загрязнение воды химическими веществами – через специфические отравления и заболевания, загрязнение воздуха – через аллергические и пульмонологиче-

ские заболевания и т. д. Проблема своевременной индикации состояния среды через состояние здоровья по заболеваемости сводится к необходимости анализа больших объемов информации.

На здоровье человека влияют факторы окружающей среды. Вопросы оценки этого влияния обсуждаются на разных уровнях. Это связано с тем, что здоровье людей – залог существования нашей цивилизации. Однако в поддержании здоровья свою роль играет не только состояние окружающей среды, но и многие другие факторы. Согласно определению ВОЗ, здоровье – состояние полного физического, психического и социального благополучия, а не просто отсутствие заболеваний или недомоганий.

Несмотря на большие успехи в области оценки влияния состояния окружающей среды на здоровье человека, необходима количественная оценка здоровья людей.

ВОЗ в течение ряда лет работает над перечнями индикаторов здоровья людей, индикаторов состояния окружающей среды, которые показывали бы ее связь с состоянием здоровья населения. Первым ощутимым результатом был перечень ПДК каждого химического вещества, занесенного в справочную таблицу. Программный комплекс при использовании географических информационных систем позволит осуществить картографический анализ информации, определить количественные зависимости между показателями здоровья населения и состояния среды обитания.

Создание информационно-аналитической базы позволит:

• определить приоритетные загрязняющие вещества, представляющие угрозу для состояния здоровья населения;

• выявить основные факторы риска при воздействии окружающей среды на различные категории населения регионов;

• изучить заболеваемость населения с целью определения возраста риска формирования превалирующей патологии;

• провести комплексную оценку здоровья на основании данных о заболеваемости населения и функциональном состоянии наблюдаемых групп людей;

• усовершенствовать механизмы управления риском среды и здоровья населения путем реорганизации деятельности госсанэпидслужбы, внедрить минимальные социальные стандарты, оптимизировать систему социально-гигиенического мониторинга (СГМ) для решения проблемных ситуаций в регионах.

Информационные системы параметров здоровья населения и окружающей среды – основной инструмент для принятия решений по формированию и совершенствованию политики снижения неблагоприятного воздействия факторов окружающей среды на здоровье людей. В соответствии с рекомендациями 2-й Европейской конференции по

окружающей среде и здоровью, изложенными в Декларации действий по окружающей среде и здоровью в Европе и Европейском плане действий по гигиене окружающей среды, должна быть создана сеть баз данных по статистическим показателям здоровья населения и состояния среды обитания, предусматривающая возможность их использования для изучения и оценки неблагоприятного воздействия среды на здоровье людей.

Индикаторами здоровья населения являются:

1) ожидаемая продолжительность предстоящей жизни (для мужчин, женщин, городского, сельского населения, при рождении, в возрасте 15, 45 и 65 лет);

2) смертность (общие и стандартизованные показатели; смертность от злокачественных новообразований органов пищеварения, органов дыхания, от рака крови);

3) младенческая смертность;

4) доля детей с массой тела при рождении меньше 2500 г;

5) показатели физического развития детей;

6) заболеваемость (ОРЗ у детей, бронхиальная астма у детей, онкологическая заболеваемость (злокачественные новообразования органов дыхания, органов пищеварения, крови, кожи), частота врожденных пороков развития, кишечные инфекции (возникновение заболеваний, причины; данные по числу заболевших, госпитализации, смертности), гепатит А, болезни щитовидной железы, профессиональные заболевания).

Например, в Российской Федерации основным инструментом изучения влияния среды обитания на здоровье населения является система СГМ. Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России формирует базу данных СГМ. Для ввода данных из регионов разработана электронная форма ввода показателей, подключенная к веб-сайту центра.

Список литературы

1. Биоиндикация природных водоемов (телекоммуникационный проект) / ГУ ЯО «Центр телекоммуникаций и информационных систем в образовании». – 2002. – Режим доступа: http://edu.yar.ru/russian/misc/eco_page/bioind/index.html.

2. Введение в экологическое моделирование / А. А. Цхай [и др.]. – Барнаул: Азбука, 2001. – 315 с.

3. *Виттих, В. А.*

4. Выявление экспертных знаний (процедуры и реализации) / О. И. Ларичев [и др.]. – М.: Наука, 1989. – 128 с.

5. *Гершензон, В. Е.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания: учебное пособие для студентов высших педагогических учеб-

ных заведений / В. Е. Гершензон, Е. В. Смирнова, В. В. Элиас; под ред. В. Е. Гершензона. – М.: Академия, 2003. – 288 с.

6. Информационные технологии для оценки экологического состояния крупного региона (на примере Волжского бассейна и Самарской области) / Г. С. Розенберг [и др.] // Проблемы региональной экологии. – Томск: СО РАН, 2000. – Вып. 8. – С. 213–216.

7. *Краснощеков, Г. П.* Естественно-исторические аспекты формирования территории Волжского бассейна / Г. П. Краснощеков, Г. С. Розенберг // Известия СамНЦ РАН. – 1999. – Т. 1, № 1. – С. 108–117.

8. *Моисеенкова, Т. А.* Принципы организации регионального банка эколого-экономической информации / Т. А. Моисеенкова, В. К. Шитиков // Моделирование процессов экологического развития. – М.: ВНИИСИ АН СССР, 1989. – № 7. – С. 110–117.

9. *Нильсен, Н. Д.* Искусственный интеллект. Методы поиска решений / Н. Д. Нильсен. – М.: Мир, 1973. – 298 с.

10. *Попченко, В. И.* Методы изучения зообентоса для оценки качества вод / В. И. Попченко, Г. П. Булгаков // Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. – С. 78–92.

11. *Розенберг, Г. С.* Волжский бассейн: экологическая ситуация и пути рационального природопользования / Г. С. Розенберг, Г. П. Краснощеков. – Тольятти: ИЭВБ РАН, 1996. – 249 с.

12. *Розенберг, Г. С.* К созданию пространственно-распределенной базы эколого-экономических данных бассейна крупной реки (на примере Волжского бассейна) / Г. С. Розенберг, Г. П. Краснощеков, В. К. Шитиков // Вопросы экологии и охраны природы в лесостепной и степной зонах: межвед. сб. науч. тр. – Самара: Изд-во «Самар. ун-т», 1995. – С. 8–15.

13. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии: учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2000. – 396 с.

14. *Сафонов, В. О.* Экспертные системы – интеллектуальные помощники специалистов / В. О. Сафонов. – СПб.: С.-Петербург. организация общ-ва «Знания» России, 1992. – 196 с.

15. Система регионального биологического мониторинга (на примере Калужской области) / Г. А. Шестакова [и др.] // Вопросы географии и геоэко логии. – Калуга, 1998. – Вып. 2. – С. 75–88.

16. *Стрельцов, А. Б.* Организация биомониторинга в г. Калуге / А. Б. Стрельцов, А. В. Шпынов, М. И. Гаркунов // Антропогенные воздействия и здоровье человека. – Калуга, 1995. – Вып. 1. – С. 10–23.

17. *Таунсенд, К.* Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ / К. Таунсенд, Д. Фохт. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 346 с.

18. *Уотермен, Д.* Руководство по экспертным системам / Д. Уотермен. – М.: Мир, 1989. – 388 с.

19. Экологическое состояние бассейна реки Чапаевка в условиях антропогенного воздействия (биологическая индикация). – Тольятти: ИЭВБ РАН, 1997. – 337 с.

20. Экспертная система для оценки экологического состояния крупного

региона (на примере Куйбышевской области) / Г. С. Розенберг [и др.] // Теоретические проблемы эволюции и экологии. – Тольятти: ИЭВБ АН СССР, 1991. – С. 183–192

21. *Элти Д.* Экспертные системы: концепции и примеры / Д. Элти, М. Кумбс. – М.: Финансы и статистика, 1987. – 191 с.

22. *Sladecek, V.* System of water quality from the biological point of view / V. Sladecek // Archiv fur Hydrobiologie. Beiheft Ergebnisse der Limnologie. – 1973. – № 7. – S. 1–128.

ГЛАВА 4
ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

4.1. Методология системного анализа

4.1.1. Системная динамика как наука

Зарождение понятия о системе как о совокупности элементов, находящихся в структурной взаимосвязи друг с другом и образующих определенную целостность, произошло еще в Древней Греции (работы Платона, Аристотеля, Евклида). В XIX в. вопрос о научном подходе к управлению сложными системами поставил А. М. Ампер. Русский ученый А. А. Богданов (настоящая фамилия – Малиновский) в 1910-е гг. выдвинул идею создания науки об общих принципах организации – тектологии, предвосхитив некоторые положения кибернетики. Обобщенное осознание системности мира получило распространение после работ Н. Винера по кибернетике – науке об общих закономерностях процесса управления и передачи информации в машинах, живых организмах и обществе. Австрийский биолог-теоретик Л. фон Берталанфи в 1940-е гг. выдвинул первую в современной науке обобщенную системную концепцию («общую теорию систем»). В исследовании систем важны также работы бельгийской школы во главе с И. Пригожиным.

Системная динамика как метод анализа динамического поведения сложных систем был разработан в Массачусетском технологическом институте в Кембридже (США). Она позволила обойти многие трудности математического моделирования, например, проблему размерностей, за счет использования компьютера и алгоритмических имитационных моделей. Системно-динамический подход сочетает в себе как отдельные методы системного анализа (качественные и количественные), так и принципы теории информации и управления организациями. Математический аппарат системной динамики – дифференциальные уравнения первого порядка.

Основателями современного этапа развития системно-динамического похода стали профессор Массачусетского технологического института Дж. Форрестер и его коллеги.

Глобальная модель Дж. Форрестера. На основе теории систем, дифференциальных уравнений и компьютерного моделирования Дж. Форрестер разработал принципы и аппарат системной динамики, позволяющий анализировать работу системы и принимать управленче-

ские решения. Он построил модель World 1 (Мир-1), предполагающую, что все изменения в установлении структуры системы обусловливаются «петлями обратных связей», замкнутыми цепочками взаимодействия, которые связывают исходное действие с его результатом, вызывающим дальнейшие изменения. В качестве основных уровней, на которых строится структура системы, автором были выбраны: население, капиталовложения в промышленность, невозобновляемые природные ресурсы, капиталовложения в сельское хозяйство, уровень загрязнения окружающей среды.

В модели World 1 (Мир-1) при определении значений констант (коэффициентов) и переменных в качестве точек отсчета были взяты условия 1970 г., т. е. состояние мировой системы описывается по отношению к ее состоянию в 1970 г.

По результатам моделирования Дж. Форрестер сделал вывод, что человечество уверенно идет навстречу катастрофе, избежать которой можно только приняв меры по ограничению и регулированию роста населения, роста производства и изменению критериев прогресса. Материальный рост не может продолжаться бесконечно, необходимо отказаться от наращивания количества в пользу качества [23].

В продолжение своих исследований Дж. Форрестер разработал модель World 2 (Мир-2) – модель городской динамики.

На основе его исследований были также построены модели World 3 (Мир-3), «Человечество перед выбором», «ЛИНК», «Разработка экономического развития», «США на пороге XXI века» и др.

На основе моделей Дж. Форрестера проводила свою работу группа Д. Медоуза. Разработанная модель получила название World 3. Цель ее создания – представить возможные пути достижения экономикой потенциальной емкости планеты. Модель мировой системы World 3 использует семь уровневых переменных:

- численность населения;
- капитал производительной сферы;
- капитал сферы обслуживания;
- капитал сельскохозяйственной сферы;
- уровень загрязнения окружающей среды;
- уровень продуктивности земель;
- невозобновляемые природные ресурсы.

Капитал сферы обслуживания и уровень продуктивности земель – важные дополнения к первоначальной схеме. Капитал сферы обслуживания более подробно описывает сложные пути оборота капитала. Фактически этот сектор создает новые петли обратных связей в обороте капитала, причем переменная капитала сферы обслуживания выступает как дополнительный резервуар, буфер капитала в процессе его экспоненциального роста. Уровень продуктивности земель выступает

как дополнительное ограничение, налагаемое на систему, пространственный предел, с которым могут столкнуться сельское хозяйство и промышленность. С одной стороны, промышленность и растущее население изымают территории, которые сельское хозяйство могло бы использовать для производства продуктов питания. С другой – в результате роста уровня загрязнений и слишком интенсивного сельскохозяйственного использования этих земель их продуктивность, уровень плодородия падают, вызывая уменьшение производства продуктов питания с единицы площади.

Помимо введения двух новых уровневых переменных, по сравнению с моделью Дж. Форрестера, в схеме есть и другие изменения. Проводится более детальный расчет сектора численности населения – в него введено возрастное распределение: суммарное население подразделяется на три группы – от 0 до 14 лет, от 15 до 44 лет (фертильный период), после 45 лет. В системе увеличилось количество связей, появилось большое количество дополнительных параметров и показателей.

Элементы модели World 3 объединяются таким образом, что их поведение становится динамически сложным. Особое внимание в этой модели уделяется времени, которое необходимо для совершения того или иного события, а также запаздыванию потоков информации и физических процессов. В основе этой модели лежат процессы с обратной связью, т. е. каждый элемент системы отчасти может служить причиной своего собственного дальнейшего поведения.

В модели World 3 основное условие развития промышленности – непрерывный экономический рост. Население прекратит увеличиваться только при достижении определенного уровня материального благосостояния. Мировые ресурсы ограничены и подвержены разрушению. Многие причинные связи в модели World 3 нелинейные и не строго пропорциональны во всей области существования функции.

По результатам работы авторы сделали следующие выводы:

«1. Если существующие тенденции роста населения мира, индустриализации, загрязнения окружающей среды, производства продуктов питания и истощения ресурсов сохранятся неизменными, то уже в течение следующего столетия человечество подойдет к пределам роста.

Наиболее вероятным результатом будет довольно резкое и неуправляемое падение как численности населения, так и промышленного производства.

2. Имеется возможность изменить эти тенденции роста и установить экологически и экономически стабильное состояние, которое может поддерживаться в далеком будущем. Состояние глобального равновесия можно спроектировать таким образом, чтобы для каждого

человека на Земле удовлетворялись основные материальные потребности и реализовался его индивидуальный потенциал.

3. Если люди всего мира решат бороться не за первый, а за второй вариант развития, то чем скорее они возьмутся за его воплощение, тем больше шансов на успех будут иметь» [14].

По результатам аналогичного исследования через 20 лет авторы сделали следующие выводы: «Экспоненциальный рост численности населения планеты, капитала, потребления ресурсов и загрязнения окружающей среды продолжается. Он подстегивается стремлением решить насущные проблемы человечества, начиная от безработицы и нищеты и кончая борьбой за достойное положение в обществе, свои права, самоутверждение.

Экспоненциальный рост может быстро выйти за любой фиксированный предел. Если один предел отодвинут, экспоненциальный рост скоро сталкивается с другим.

Вероятно, из-за запаздывания обратных связей мировая экономическая система выходит за пределы устойчивости и разрушает их. Действительно, для многих источников и стоков, важных для мировой экономики, выход за пределы уже произошел.

Технология и рынок всегда функционируют с запаздыванием и используют лишь искаженную информацию. Они сами состоят из процессов с отрицательными обратными связями, реакция которых запаздывает. Это усиливает тенденцию экономики к выходу за пределы.

Технология и рынок служат ценностям либо всего общества, либо его наиболее могущественной части. Если основная цель – рост, то они, по мере возможностей, будут обеспечивать рост. Если основная цель – справедливость и устойчивость, они могут служить и этим целям.

Когда численность населения и экономика вышли за физические пределы Земли, есть только два пути назад: неизбежный коллапс, обусловленный ростом дефицита и кризисами, либо добровольное контролируемое снижение обществом объемов потребления» [14].

4.1.2. Системный подход к изучению биологических объектов

Системный подход к изучению биологических объектов берет начало от работ Л. фон Берталанфи. Со второй половины XX в. системная организация биологических объектов рассматривается как фундаментальное свойство [1; 2; 7; 10; 19; 20; 24]. При этом констатируется наличие фиксированных связей между частями целого, исчезновение некоторых свойств при включении их в систему, появление у возникшей системы новых свойств, которые отсутствуют у частей при их изолированном существовании.

Элементарной структурой любого организма является клетка. Межклеточные взаимодействия наблюдаются уже в колониях микроорганизмов. У многоклеточных автотрофных организмов основную роль в регуляции высших уровней играют биоэлектрические сигналы, трофический транспорт, конкуренция между органами за метаболиты и гормональная регуляция. Известно, что фотосинтез, репарационные процессы и старение в отсеченном и прикрепленном к растению листе существенно различаются. Это очень затрудняет экстраполяцию результатов, полученных на изолированных органах, на те же структуры в системе организма.

Большинство используемых в физиологии и агрохимии методов анализа имеют в основе методы, заимствованные из классической физики, химии или биохимии, где роль системной организации объекта сравнительно мала. Но реакции изолированных клеток и тканей на внешние воздействия значительно отличаются от поведения этих элементов, находящихся в системе организма.

Причиной многих разногласий в современной биологии является необходимость одновременно думать о явлениях молекулярного и организменного уровней, для чего следует иметь минимум представлений о промежуточном физиологическом уровне [25]. К этому следует добавить проблему биологической целесообразности, от которой свободны физика и химия.

Методы и стратегия исследования напрямую зависят от уровня организации изучаемого объекта.

Пример 1. Рассмотрим величину продуктивности фотосинтеза на клеточном и организменном уровнях. При ее определении на высечках листьев получаются величины, во много раз превышающие фиксацию углекислого газа целым растением или посевом. В стандартных условиях определения фотосинтеза на высечках скорость ассимиляции зависит только от пропускной способности биохимических систем и диффузии газов из воздуха в клетки. Более низкие показатели фотосинтеза у целого растения обусловлены недостаточной скоростью транспорта ассимилятов, переполнением ими клеток мезофилла и торможением фотосинтеза собственными продуктами по принципу обратной связи. Депрессия фотосинтеза в целостной системе может зависеть и от других причин: недостаточной оводненности тканей (закрыты устьица) и торможения роста (отсутствие потребления ассимилятов и др.). И напротив, стимуляция роста растения, образование различных «депо» для накопления метаболитов (плоды, семена, луковицы и т. д.), усиление транспорта веществ по сосудам способствуют быстрому оттоку ассимилятов из листьев и неизбежно приводят к повышению продуктивности фотосинтеза.

Пример 2. Изучая водный режим методом извлечения воды из тканей листа растворами сахарозы, исследователь определяет силу связи

ее гидратированными коллоидами и осмотически активными веществами. Если же водоудержание определяется по скорости потери веса отсеченным листом (метод А. А. Ничипоровича), то полученные результаты характеризуют не только физическое водоудержание клеток, но и гидрофобность кутикулы и полноту закрытия устьиц. Водный режим растения в вегетационном сосуде в дополнение к этому будет зависеть от перераспределения воды между органами и эффективности подачи ее корневой системой. В естественной же обстановке глубина проникновения корней в почву и синхронизация онтогенеза с климатическими сезонами в оптимизации водного режима имеют большее значение, чем физическое водоудержание тканей листа.

4.1.3. Ошибки несистемного подхода

Эксперимент как диалог наблюдателя с изучаемым объектом будет иметь смысл только при установлении первичных связей, а не отдаленных последствий или вторичных несущественных эффектов. Этот постулат раскрывает источник многих ошибок, особенно частых при экстраполяции результатов упрощенных экспресс-опытов на характеристики целого растения или посева. При работе с селекционным материалом желательно использовать достаточно быстрый метод, позволяющий с минимальными затратами труда дать массовую оценку образцов на ранних этапах отбора. Такая диагностика основана на корреляционной (но не всегда на функциональной) связи наблюдаемого биохимического или биофизического параметра с устойчивостью или продуктивностью. Но последние являются итогом многих физиологических процессов, молекулярных, генетических и морфологических особенностей растения. Часто их взаимодействия настолько переплетены, что трудно выделить главенствующий фактор. В таких случаях говорят о полигенной детерминации признака. Вопрос о выборе сроков наблюдения и параметров, которые бы обеспечили корректность опыта и соответствие оценок процессам, протекающим в целом растении, должен решаться на основе системного подхода.

Периодичность наблюдения, взятия проб для анализа во всех случаях должна быть сопоставима со скоростью реагирования того уровня организации, который является объектом нашего исследования. Биология имеет дело с системами, для которых главным свойством является изменение, развитие, динамика во времени. Чтобы зафиксировать ее, наблюдения следует проводить достаточно часто. В противном случае существует риск обнаружить только два стационарных состояния (исходное и конечное) без перехода между ними. Если же интервалы между наблюдениями слишком малы, то можно не заметить существенных изменений, так как избранные периоды окажутся меньше, чем время реагирования данного уровня системы.

Следовательно, изучение молекулярных или клеточных процессов должно проводиться с малыми интервалами между наблюдениями (от нескольких секунд до одного часа), а при работе на уровне целостного растения – с суточными, недельными и даже месячными интервалами. Химический анализ растения, проведенный через несколько дней после воздействия на объект, отражает не столько клеточный уровень саморегуляции, сколько корректирующее влияние организма на физиологию клеток данного органа.

Допустим, экспериментатор изучает индукцию нитратредуктазы в связи с внесением в питательную среду нитрата. При исследовании индукции на биохимическом уровне (клетка) определение нитратредуктазной активности следует проводить в гомогенате или на высечках листа после различных по продолжительности экспозиций его в индуцирующей среде. В случае исследования тканевых процессов используется отсеченный лист, и в процессе индукции могут быть применены ингибиторы синтеза белка, нуклеиновых кислот, разобщители дыхания от фосфорилирования и т. д. При исследовании организменного уровня (организм) экспериментатор помещает в питательный раствор корни растения, выращенного на безнитратной среде, а потом определяет количество восстановленного азота в листьях разного возраста. Для построения динамической кривой, как и в предыдущих случаях, следует провести достаточно длинный ряд определений, интервалы между ними будут измеряться уже не минутами, а многими часами и сутками.

Полная характеристика индукции этого фермента может быть получена только в том случае, когда определение скорости восстановления нитратов будет проведено в одни сроки во всех органах. В этом случае можно рассчитать баланс активности всего организма и установить долю отдельных его частей. Часто практикуется определение активности фермента только в наиболее молодом листе, но такой опыт не может дать характеристик сорта.

Более или менее полный охват органов растения химическими анализами, да еще и при изучении временной динамики, достаточно трудоемок. По этой причине исследователь обычно определяет только те показатели, которые интегрально отражают общее состояние данного уровня организации. Применительно к целостному организму такими показателями являются сухой и сырой вес растения, площадь листьев, линейные размеры органов и др. Часто приходится сталкиваться с неуважительным отношением к подобным «несовременным» характеристикам как к чему-то несерьезному, недостойному науки.

Предположим, исследователь определил зимостойкость сортов, фиксируя температуру гибели клеток листа по вспышке сверхслабого свечения или по необратимому разобщению дыхания от фосфорилиро-

вания. Несовпадение полевого испытания с этим экспериментом может иметь несколько причин. Озимые культуры могут успешно отрастать и при полной гибели листьев. Использование последних в качестве объекта диагностики дает заниженную оценку сортам, которые зимуют с потерей листьев, но с хорошей сохранностью узлов кущения. И дело не только в различной морозостойкости их тканей. Расположенные в почве узлы кущения зимуют при более благоприятной температуре по сравнению с надземными органами. И чем глубже они залегают, тем выше зимостойкость генотипа. В этом причина ошибок лабораторных оценок этого признака на изолированных узлах кущения. Определенную роль будет играть и ориентация листьев. Распростертость розетки обеспечивает лучшую сохранность листового аппарата во время зимовки. Указанные методы диагностики отражают морозостойкость клеток и тканей (но не организма), зависящую от генетически обусловленной конформации молекул биополимеров, структуры мембран и органелл. Морфологические же признаки растения относятся к организменному уровню приспособления.

Углубление в эту проблему приведет также к выяснению роли такого организменного процесса, как осенняя закалка и связанное с ней торможение роста. На каком-то этапе исследователь может обнаружить, что гибель озимых в данной зоне определяют не низкие, а повышенные (около 0°) температуры под толстым снежным покровом. Значит, имеет место не вымерзание, а выпревание – процесс с другими защитными механизмами. Для неспециалистов в этой области добавим, что причиной гибели могли быть вымокание, гибель весной от заморозков, осеннее повреждений цикадкой. Устойчивость к ним, конечно же, не тестировалась в описанном эксперименте и требовала иных условий испытания. Поэтому в самом начале работы необходимо изучить экологическую обстановку и выделить условия, которые играют определяющую роль в изучаемом явлении.

4.1.4. Система и системный анализ

Современный системный анализ в биологии и сельском хозяйстве довольно молод и недостаточно разработан, живые системы очень сложны, велика роль случайности в их поведении. Но без понимания системного подхода, без системного мышления эколог не может состояться.

Система – это любая совокупность взаимосвязанных составляющих, объединенных прямыми и обратными связями в некое единство. По природе элементов системы бесконечно разнообразны, но у всех есть одна особенность – иерархичность соподчинения элементов. Иерархичность – это подчинение простых уровней системы более сложным. Ниже приведено условное обозначение и описание уровней иерархии живых систем (рисунок 5).

Уровень	описание уровня
…	…
i+1	популяция
i	организм
i-1	органы
i-2	ткани
i-3	клетки
i-4	органеллы
i-5	макромолекулы
…	…

Рис. 5. **Условное обозначение и описание уровней иерархии живых систем**

Иерархия систем характерна не только для живых систем, но и для коммерческих предприятий, социального устройства, электронного оборудования и др. Описание поведения животного на уровне *I* имеет право на существование само по себе. Однако исследуемое явление можно понять еще лучше, если проанализировать процессы, относящиеся к более низким уровням иерархии.

Объекты, принадлежащие каждому структурному уровню, могут рассматриваться как системы, образованные из подсистем (объектов более низких уровней), и как подсистемы, входящие в состав некоторой системы (объект более высокого уровня).

Для иерархических систем характерны три важных свойства:

• каждый уровень иерархии имеет свои принципы и законы (понятия «производство продуктов животноводства» или «урожайность сельскохозяйственной культуры» бессмысленны на уровне клетки или органеллы);

• на каждом уровне иерархии происходит обобщение свойств объектов более низких уровней, т. е. описание уровня *I* способствует пониманию явлений, происходящих на уровне $I + 1$;

• взаимосвязи между уровнями несимметричны: для нормального функционирования объектов высшего уровня необходимо, чтобы успешно «работали» объекты более низкого уровня, но не наоборот.

Системный анализ – это:

1) стратегия научного поиска, которая использует математический аппарат для организации наших знаний об объекте с целью выбора нужной стратегии управления;

2) упорядоченная и логическая организация информации в виде моделей, которая сопровождается проверкой и анализом самих моделей для их улучшения.

Системный подход ориентирован на изучение специфических характеристик систем, многообразие связей элементов, их разнокачественность и соподчинение.

Системность подхода свойственна работам В. Вернадского, Л. фон Берталанфи, Дж. Форрестера и др.

Из представленной описательной части систем легко выводятся основные принципы системологии [16; 17; 21]:

1) *принцип эмерджентности* [15], важную роль которого в экологии особо подчеркивает Ю. Одум [12]: «...принцип не сводимости свойств целого к сумме свойств его частей должен служить первой рабочей заповедью экологов»;

2) *принцип иерархической организации,* или *принцип интегративных уровней* [11];

3) *принцип несовместимости Л. Заде* [5]: чем глубже анализируется реальная сложная система, тем менее определенны наши суждения о ее поведении;

4) п*ринцип контринтуитивного поведения Дж. Форрестера* [22; 23]: дать удовлетворительный прогноз поведения сложной системы на достаточно большом промежутке времени, опираясь только на собственный опыт и интуицию, практически невозможно.

4.1.5. Этапы системного анализа

Системный анализ – это скорее способ мышления, чем набор рецептов. Следовательно, для решения некоторых задач может быть изменен порядок следования этапов или какие-то этапы устранены.

Системный анализ позволяет выявить те факторы и взаимосвязи, которые впоследствии могут оказаться весьма существенными.

Выбор проблемы. Осознание того, что существует некая достаточно важная для детального изучения проблема, которую можно исследовать с помощью системного анализа, не всегда оказывается тривиальным шагом. Само понимание того, что необходим действительно системный анализ проблемы, столь же важно, как и выбор правильного метода исследования. С одной стороны, можно взяться за решение проблемы, не поддающейся системному анализу, а с другой – выбрать проблему, которая не требует для своего решения всей мощи системного анализа и изучать которую данным методом было бы неэкономично. Такая двойственность первого этапа делает его критическим для успеха или неудачи всего исследования. Специалисты по системному анализу должны хорошо вникнуть в проблему и начать работать над ее решением. В целом подход к решению реальных проблем действительно требует большой интуиции, практического опыта, воображения и того, что называется чутьем. Эти качества особенно важны, когда сама проблема, как это часто случается, изучена довольно слабо.

Постановка задачи и ее упрощение. Когда существование проблемы осознано, требуется упростить задачу настолько, чтобы она скорее всего имела аналитическое решение, в то же время сохраняя все те элементы, которые делают проблему достаточно интересной для практического изучения. Здесь мы вновь имеем дело с критическим этапом любого системного исследования. Вывод о том, стоит ли рассматривать тот или иной аспект данной проблемы, а также результаты сопоставления значимости конкретного аспекта для аналитического отражения ситуации с его ролью в усложнении задачи, которое вполне может сделать ее неразрешимой, часто зависит от накопленного опыта в применении системного анализа. Именно на этом этапе опытный специалист по системному анализу может внести наиболее весомый вклад в решение проблемы. Успех или неудача всего исследования во многом зависит от равновесия между упрощением и усложнением, при котором сохранены все связи с исходной проблемой, достаточные для того, чтобы аналитическое решение поддавалось интерпретации. Множество заманчивых проектов оказывались, в конце концов, неосуществленными из-за того, что принятый уровень сложности затруднял последующее моделирование, не позволяя получить решение. И напротив, в результате многих системных исследований, выполненных в самых разных областях экологии, были получены тривиальные решения задач, которые на самом деле составляли лишь подмножества исходных проблем.

Установление иерархии целей и задач. После постановки задачи и ограничения степени ее сложности можно приступать к установлению целей и задач исследования. Обычно эти цели и задачи образуют некую иерархию, причем основные задачи последовательно подразделяются на ряд второстепенных. В такой иерархии необходимо определить приоритеты различных стадий и соотнести их с теми усилиями, которые необходимо приложить для достижения поставленных целей. Таким образом, в сложном исследовании специалист по системному анализу может присвоить сравнительно малый приоритет тем целям и задачам, которые хотя и важны с точки зрения получения научной информации, но слабо влияют на вид решений, принимаемых относительно воздействий на экосистему и управления ею. В иной ситуации, когда данная задача составляет часть программы какого-то фундаментального исследования, исследователь заведомо ограничен определенными формами управления и концентрирует максимум усилий на задачах, которые непосредственно связаны с самими экологическими процессами. Во всяком случае, для плодотворного применения системного анализа очень важно, чтобы приоритеты, присвоенные различным задачам, были четко определены.

Выбор путей решения задач. На данном этапе исследователь может выбрать несколько путей решения проблемы. Как правило, опыт-

ному специалисту по системному анализу сразу видны семейства возможных решений конкретных задач. В любом случае он будет искать наиболее общее аналитическое решение, поскольку это позволит максимально использовать результаты исследования аналогичных задач и соответствующий математический аппарат. Каждая конкретная задача обычно может быть решена более чем одним способом. И вновь выбор семейства, в рамках которого следует искать аналитическое решение, зависит от опыта специалиста по системному анализу. Неопытный исследователь может затратить много времени и средств в попытках применить решение из какого-либо семейства, не сознавая, что это решение получено при допущениях, несправедливых для того частного случая, с которым он имеет дело. Аналитик же часто разрабатывает несколько альтернативных решений и только позже останавливается на том из них, которое лучше подходит для его задачи.

Моделирование. После того, как проанализированы подходящие альтернативы, можно приступать к важному этапу – моделированию сложных динамических взаимосвязей между различными аспектами проблемы. При этом следует помнить, что моделируемым процессам, а также механизмам обратной связи присуща внутренняя неопределенность, а это может значительно усложнить как понимание системы, так и ее управляемость. Кроме того, в самом процессе моделирования нужно учитывать сложный ряд правил, которые необходимо будет соблюдать при выработке решения о подходящей стратегии. На этом этапе математику очень легко увлечься изяществом модели, и в результате будут утрачены все точки соприкосновения между реальными процессами принятия решений и математическим аппаратом. Более того, при разработке модели в нее часто включаются непроверенные гипотезы, а оптимальное число подсистем предопределить достаточно сложно. Можно предположить, что более сложная модель полнее учитывает сложности реальной системы, но хотя это предположение интуитивно кажется вполне корректным, необходимо принять во внимание дополнительные факторы. Рассмотрим, например, гипотезу о том, что более сложная модель дает и более высокую точность с точки зрения неопределенности, присущей модельным прогнозам. Вообще говоря, систематическое смещение, возникающее при разложении системы на несколько подсистем, связано со сложностью модели обратной зависимостью, но налицо и соответствующее возрастание неопределенности из-за ошибок измерения отдельных параметров модели. Те новые параметры, которые вводятся в модель, должны определяться количественно в полевых и лабораторных экспериментах, и в их оценках всегда есть некоторые ошибки. Пройдя через имитацию, эти ошибки измерений вносят свой вклад в неопределенность полученных прогнозов. По всем этим причинам в любой модели выгодно уменьшать число включенных в рассмотрение подсистем.

Оценка возможных стратегий. Как только моделирование доведено до стадии, на которой модель можно использовать, начинается этап оценки потенциальных стратегий, полученных из модели. Если окажется, что основные допущения некорректны, возможно, придется вернуться к этапу моделирования, но часто удается улучшить модель, незначительно модифицировав исходный вариант. Обычно необходимо также исследовать «чувствительность» модели к тем аспектам проблемы, которые были исключены из формального анализа на втором этапе, т. е. когда ставилась задача и ограничивалась степень ее сложности.

Внедрение результатов. Заключительный этап системного анализа представляет собой применение на практике результатов, которые были получены на предыдущих этапах. Если исследование проводилось по вышеописанной схеме, то шаги, которые необходимо для этого предпринять, будут достаточно очевидны. И все же системный анализ нельзя считать завершенным, пока исследование не дойдет до стадии практического применения, и именно в этом отношении многие работы оказывались невыполненными. В то же время как раз на последнем этапе может выявиться неполнота тех или иных стадий или необходимость их пересмотра, в результате чего понадобится еще раз пройти какие-то из уже завершенных этапов.

4.1.6. Состав, структура, функция системы

Элементы, образующие систему Y, обозначаются символами X_1, X_2, …, X_n, где n – число элементов. Множество ΣX, состоящее из всех элементов, $\Sigma X = \{X_1, X_2, \ldots, X_n\}$, назовем составом системы.

Множество внешних систем, находящихся в существенной связи с системой Y, обозначим $\Sigma V = \{V_1, V_2, \ldots, V_k\}$ – это окружающая среда системы Y.

Множество связей элементов системы Y между собой и их связи с внешней средой назовем структурой системы Y и обозначим $\Sigma\delta = \{\delta_1, \delta_2, \ldots, \delta_n\}$.

Внешняя среда, состав и структура системы могут изменяться во времени: $V = V(t)$, $X = X(t)$, $\delta = \delta(t)$.

Функцией системы $Y(t)$ назовем закон F, по которому в зависимости от внешних факторов $V(t)$ происходит изменение во времени внутренних элементов $X(t)$ и структуры $\delta(t)$ системы Y.

Системой $Y(t)$, функционирующей в окружающей среде $V(t)$, называется объект, образуемый элементами множества $X(t)$, которые связаны между собой и окружающей средой определенными связями $\delta(t)$. Состав и структура изменяются во времени в соответствии с функцией F.

4.1.7. Огрубляющее и гомоморфное отображение объекта

Сущность метода моделирования состоит в том, что наряду с системой-оригиналом $I^0 = I^0$ (X^0, V^0, δ^0, F^0) существует ее модель $I = (X, V, \delta, F)$; модель I – подобие системы I^0 (рисунок 6).

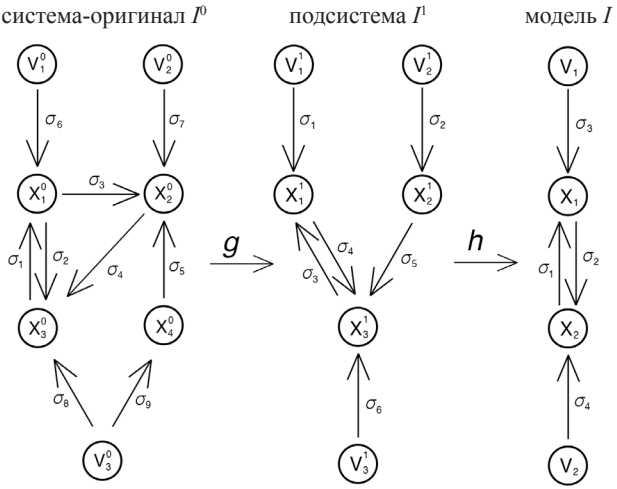


Рис. 6. **Схема гомоморфного и огрубляющего отображений при моделировании**

Обозначим через f закономерность, в соответствии с которой система-оригинал преобразуется в модель: $f : (I^0) \rightarrow I$, при этом не все особенности I^0 отображаются в I. Создание модели может происходить в несколько этапов через разработку промежуточной подсистемы I^1.

$$f = q + h,$$

где f – моделирующее отображение; q – огрубляющее отображение; h – гомоморфное отображение.

Моделирующее отображение f можно представить в виде сочетания двух последовательных отображений: гомоморфного и огрубляющего:

$$q : (I^0) \rightarrow I^1;$$
$$h : (I^1) \rightarrow I.$$

Моделирование – это один из важнейших методов научного познания, с помощью которого создается модель (условный образ) объекта исследования. Его сущность заключается в том, что взаимосвязь исследуемых явлений и факторов передается в форме конкретных математических уравнений.

4.1.8. Этапы моделирования

В моделировании выделяют несколько этапов.

Первый этап – *уяснение целей моделирования.* Это главный этап любой деятельности. Цель существенным образом определяет содержание остальных этапов моделирования. Заметим, что различие между простой системой и сложной порождается не столько их сущностью, но и целями, которые ставит исследователь. Обычно целями моделирования являются:

- прогноз поведения объекта при новых режимах, сочетаниях факторов и т. п.;
- подбор сочетания и значений факторов, обеспечивающих оптимальное значение показателей эффективности процесса;
- анализ чувствительности системы на изменение тех или иных факторов;
- проверка различного рода гипотез о характеристиках случайных параметров исследуемого процесса;
- определение функциональных связей между поведением («реакцией») системы и влияющими факторами, что может способствовать прогнозу поведения или анализу чувствительности;
- уяснение сущности, лучшее понимание объекта исследования, а также формирование первых навыков для эксплуатации моделируемой или действующей системы.

Второй этап – *построение концептуальной модели.* ***Концептуальная модель*** (от лат. *conception*) – модель на уровне определяющего замысла, который формируется при изучении моделируемого объекта. На этом этапе исследуется объект, устанавливаются необходимые упрощения и аппроксимации, единицы измерения и диапазоны изменения переменных модели, выявляются существенные аспекты, исключаются второстепенные. Если возможно, то концептуальная модель представляется в виде известных и хорошо разработанных систем: массового обслуживания, управления, авторегулирования, разного рода автоматов и т. д.

Концептуальная модель полностью подводит итог изучению проектной документации или экспериментальному обследованию моделируемого объекта. Результат второго этапа – обобщенная схема модели, полностью подготовленная для математического описания – построения математической модели.

Третий этап – *выбор языка программирования или моделирования, разработка алгоритма и программы модели.* Модель может быть аналитической, имитационной или их сочетанием. В случае аналитической модели исследователь должен владеть методами решения.

Результат третьего этапа – программа, составленная на наиболее удобном для моделирования и исследования языке – универсальном или специальном.

Четвертый этап – *планирование эксперимента.* Математическая модель является объектом эксперимента. Эксперимент должен быть в максимально возможной степени информативным, удовлетворять ограничениям, обеспечивать получение данных с необходимой точностью и достоверностью. Результат четвертого этапа – план эксперимента.

Пятый этап – *выполнение эксперимента с моделью.* Если модель аналитическая, то эксперимент сводится к выполнению расчетов при варьируемых исходных данных. При имитационном моделировании модель реализуется на компьютере с фиксацией и последующей обработкой получаемых данных. Эксперименты проводятся в соответствии с планом, который может быть включен в алгоритм модели. В современных системах моделирования такая возможность есть.

Шестой этап – *обработка, анализ и интерпретация данных эксперимента.* В соответствии с целью моделирования применяются разнообразные методы обработки: определение разного рода характеристик случайных величин и процессов, выполнение дисперсионного, регрессионного, факторного и т. д. анализа. Многие из этих методов входят в системы моделирования и могут применяться автоматически. Не исключено, что в ходе анализа полученных результатов модель может быть уточнена, дополнена или даже полностью пересмотрена.

После анализа результатов моделирования осуществляется их интерпретация, т. е. перевод результатов в термины предметной области. Это необходимо, так как обычно специалист предметной области (тот, кому нужны результаты исследований) не обладает терминологией математики и моделирования и может выполнять свои задачи, оперируя лишь хорошо знакомыми ему понятиями.

Таким образом, во-первых, моделирование – процесс итеративный, т. е. с каждого этапа может осуществляться возврат на любой из предыдущих этапов для уточнения информации, необходимой на этом этапе, а документация может сохранить результаты, полученные на предыдущей итерации. Во-вторых, в случае исследования сложной системы в нем участвуют большие коллективы разработчиков, причем различные этапы выполняются различными коллективами. Поэтому результаты, полученные на каждом этапе, должны быть переносимы на последующие этапы, т. е. иметь унифицированную форму представления и понятное другим заинтересованным специалистам содержание. В-третьих, результат каждого этапа должен являться самоценным продуктом. Например, концептуальная модель может и не использоваться

для дальнейшего преобразования в математическую модель, а являться описанием, хранящим информацию о системе, которое может использоваться как архив в качестве средства обучения, и т. д.

4.1.9. Ценность математических моделей в экологии

Математическая модель – это мощное средство обобщения разнородных данных об объекте, позволяющее осуществлять как интерполяцию (восстановление недостающей информации о прошлом), так и экстраполяцию (прогнозирование будущего поведения объекта).

Гипотезы об объекте, выраженные математически, могут служить количественным описанием биологических, сельскохозяйственных и других объектов (процессов) и тем самым способствуют более углубленному их пониманию.

Математическая модель часто подсказывает способ представления результатов научных исследований в форме, удобной для использования на практике (графики, гистограммы), позволяет выбрать оптимальную стратегию воздействия на объект, дает возможность сократить объем дальнейших экспериментальных работ с объектом, благодаря ей может быть количественно оценена экономическая эффективность внедрения нового объекта или процесса в производство. При исследовании сложных объектов модель позволяет объединить разрозненные знания об отдельных частях системы в единое целое, выбрать наиболее рациональную стратегию и тактику реализации исследовательских программ (теория планирования эксперимента).

В основе любой математической модели и метода ее анализа лежит математический аппарат. Это могут быть дифференциальные уравнения, формулы теории вероятностей, математической статистики и т. д. Правильный подбор математического аппарата – необходимое условие построения удачной модели.

Список литературы

1. *Анохин, П. К.* Избранные труды / П. К. Анохин. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

2. *Беликова, М. А.* О кибернетических вопросах биологии / М. А. Беликова, А. А. Ляпунов // О некоторых вопросах кодирования и передачи информации в управляющих системах живой природы. – Новосибирск: СО АН СССР, 1971. – С. 3–98.

3. *Гершензон, В. Е.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания: учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / В. Е. Гершензон, Е. В. Смирнова, В. В. Элиас; под ред. В. Е. Гершензона. – М.: Академия, 2003. – 288 с.

4. *Дулепов, В. И.* Системная экология: учебное пособие / В. И. Дулепов, О. А. Лескова, И. С. Майоров; под ред. Л. И. Александровой. – Владивосток, 2004. – 209 с.

5. *Заде, Л.* Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений / Л. Заде // Математика сегодня. – М.: Знание, 1974. – С. 5–49.

6. *Карпов, Ю.* Имитационное моделирование систем: введение в моделирование с AniLogic 5 / Ю. Карпов. – СПб.: ПХВ-Петербург, 2005. – 400 с.

7. *Кастлер, Г.* Общие принципы анализа систем / Г. Кастлер // Теоретическая и математическая биология. – М.: Мир, 1968. – С. 339–362.

8. *Кельтон, В.* Имитационное моделирование / В. Кельтон, А. Лоу. – 3-е изд. – СПб.: Питер: Киев: Изд. группа BHV, 2004. – 847 с.

9. *Коваль, С. Ф.* Растение в опыте / С. Ф. Коваль, В. П. Шаманин. – Омск, 1999. – 201 с.

10. *Кремянский, В. И.* Структурные уровни живой материи / В. И. Кремянский. – М.: Наука, 1969. – 295 с.

11. *Одум, Ю.* Экология: в 2 т. / Ю. Одум. – М.: Мир, 1986.

12. *Одум, Ю.* Основы экологии / Ю. Одум. – М.: Мир, 1975. – 740 с.

13. *Перегудов, Ф. И.* Основы системного анализа / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. – 2-е изд., доп. – Томск: НТЛ, 1997. – 396 с.

14. Пределы роста: доклад по проекту римского клуба «Сложное положение человечества» / Д. Х. Медоуз [и др.]. – М., 1991.

15. *Реймерс, Н. Ф.* Природопользование: словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М.: Мысль, 1990. – 639 с.

16. *Розенберг, Г. С.* Модели в фитоценологии / Г. С. Розенберг. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

17. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: СамНЦ РАН, 1999. – 396 с.

18. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии: учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: СамНЦ РАН, 2000. – 396 с.

19. *Сержантов, В. Ф.* Введение в методологию современной биологии / В. Ф. Сержантов; отв. ред. Е. Ф. Солопов; АН СССР, Ленинград. каф. философии. – Л.: Наука, 1972. – 282 с.

20. *Старостин, Б. А.* Системный подход, параметры и сложность биологических объектов / Б. А. Старостин // Системные исследования. Ежегодник. – М.: Наука, 1974. – С. 120–145.

21. *Флейшман Б. С.* Основы системологии / Б. С. Флейшман. – М.: Радио и связь, 1982. – 368 с.

22. *Форрестер, Дж.* Антиинтуитивное поведение сложных систем / Дж. Форрестер // Современные проблемы кибернетики. – М.: Знание, 1977. – С. 9–25.

23. *Форрестер, Дж.* Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 420 с.

24. *Шмальгаузен, И. И.* Организм как целое в индивидуальном и историческом развитии / И. И. Шмальгаузен. – М.: Наука, 1982. – 383 с.

25. *Холдейн, Дж. Б.* Время в биологии // Природа. – 1966. – № 8. – С. 37–44. // Электронный ресурс. Режим доступа: http://vivovoco.rsl.ru/vv/books/haldane/biotime.htm. Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat http://www.dissercat.com/content/kontseptualizatsiya-vremeni-v-raznykh-kulturakh#ixzz5H4CLRDdH.

4.2. Математические модели в системном анализе

4.2.1. Классификация моделей

Модель – это:

• упрощенное подобие системы-оригинала;

• формальное выражение основных элементов проблемы в физических или математических терминах, которое отображает свойства объекта исследования, взаимосвязи, структурные и функциональные параметры;

• логическое или математическое описание компонентов и функций, отображающих существенные свойства моделируемого объекта или процесса (обычно рассматриваемых как системы или ее элементы).

Модель используется как условный образ, сконструированный для упрощения исследования.

Природа моделей различна. В зависимости от особенностей системы-оригинала и задач исследования применяются разнообразные модели (рисунок 7).

Рис. 7. **Классификация моделей**

Словесные модели – описание моделируемых процессов и объектов при помощи слов. Некоторые специалисты по системному анализу считают построение словесной модели важным этапом, на котором объединяется все, что связано с решаемой проблемой, с целью выделения той части системы, которую, с их точки зрения, необходимо исследовать. Часто несколько ученых, занимающихся одной и той же проблемой, не соглашаются с описанием своих коллег, предложенным для данной экологической системы. Поэтому есть все основания потратить определенное время на то, чтобы найти описание (определения, термины), удовлетворяющее всех заинтересованных исследователей. Такое описание может во многом помочь на стадиях постановки задачи и ограничения ее степени сложности и установления иерархии целей и задач исследования. В подобной роли словесная модель может принести неоценимую пользу.

Реальные модели отражают существенные черты оригинала. Например, аквариум с растениями, животными, микроорганизмами воспроизводит некоторые черты обитаемых природных водоемов уже потому, что сам является населенным водоемом, хотя и меньших размеров. Одна из наиболее сложных проблем, возникающих при работе с реальными моделями, – трудность установления степени соответствия модели оригиналу и, следовательно, трудность обоснования возможности применения результатов моделирования к исходной системе-оригиналу.

Натурные модели широко применяются в аэро- и гидродинамике, где разработаны количественные модели адекватности. Кроме того, их создание и использование в экологии связано с трудностями технического характера, преодоление которых из-за отсутствия гарантий адекватности не всегда приводит к решению поставленной задачи.

Знаковые модели представляют собой условное описание системы-оригинала с помощью определенного алфавита символов и операций над символами, в результате чего получаются слова и предложения некоторого языка, которые с помощью определенного кода интерпретируются как образы некоторых свойств элементов системы-оригинала и связей между ними.

Концептуальная модель представляет собой более формализованный и систематизированный вариант традиционного естественнонаучного описания изучаемой системы, состоящий из научного текста, блок-схемы системы, таблиц, графиков, набора символов, математических зависимостей и т. д. Это могут быть определенные конструкции из общепринятых знаков на бумаге или другом материальном носителе или в виде компьютерной программы. Назначение концептуальной модели – быть ясным, обобщенным и в то же время достаточно полным выражением знаний и представлений исследователя об изучаемой системе в рамках и средствами определенной научной концепции. Например, в «энергетической» и «биохимической» концепциях соответствующие концептуальные модели принимают форму блок-схемы трофических связей или потоков вещества в экосистеме и сопровождаются поясняющим текстовым, табличным и графическим материалом, раскрывающим состав, структуру и функции системы.

Математическая модель – набор формальных соотношений, которые отображают поведение исследуемой системы. Данная модель является самой сложной и наиболее общей и абстрактной по сравнению с изобразительной и аналоговой. В ней для отображения свойств изучаемого явления используются символы математического или логического характера. Особые трудности возникают при решении задач с большой размерностью, расплывчатой постановкой, неопределенностью информации и т. д. В постановке таких задач появляются неклассические моменты, такие как плохая формализуемость, нестандартность,

противоречивость. Математические модели служат отражению и анализу некоторых свойств действительных объектов.

4.2.2. Аналитические и имитационные модели

Аналитические модели (англ. *analytical models*) – один из классов математического моделирования, широко используемый в экологии. Они ориентированы на углубление знаний и получение информации о сущности объекта, описывают поведение системы i-того уровня, используя знания и параметры уровня *i*-1. Их еще называют функциональными, так как они являются инструментом фундаментальной науки.

При построении таких моделей исследователь сознательно отказывается от детального описания экосистемы, оставляя лишь наиболее существенные, с его точки зрения, компоненты и связи между ними, и использует достаточно малое число правдоподобных гипотез о характере взаимодействия компонентов и структуры экосистемы. Аналитические модели служат, в основном, целям выявления математического описания, анализа и объяснения свойств или наблюдаемых феноменов, присущих максимально широкому кругу экосистем. Так, например, широко известная модель конкуренции Лотки – Вольтерра позволяет указать условия взаимного сосуществования видов в рамках различных сообществ.

В качестве примера аналитической модели гидробиологических процессов «цветения водохранилищ» укажем на работы С. В. Крестина и Г. С. Розенберга [5; 6], где в рамках взаимодействий систем конкуренции видов и «хищник – жертва» дано возможное объяснение феномена вспышек численности сине-зеленых водорослей и более сложного процесса «волны цветения» по профилю водохранилища.

Имитационные модели (англ. *simulation models*) – один из основных классов математического моделирования. Цель построения имитаций – максимальное приближение модели к конкретному (чаще всего уникальному) экологическому объекту и достижение максимальной точности его описания. Имитационные модели претендуют на выполнение как объяснительных, так и прогнозных функций, являются описанием системы в пределах одного уровня иерархии и представляют собой уравнения, отражающие связь между параметрами в данной системе. Они реализуются на компьютере с использованием блочного принципа, позволяющего всю моделируемую систему разбить на ряд подсистем, связанных между собой незначительным числом обобщенных взаимодействий и допускающих самостоятельное моделирование с использованием своего собственного математического аппарата, что позволяет также достаточно просто конструировать (путем замены отдельных блоков) новые имитационные модели.

Построение имитационной модели может служить организующим началом любого серьезного экологического исследования. Хотя частная экосистема реки или озера и является элементарной ячейкой биосферы, ее математическая модель описывается системами уравнений того же порядка сложности, что и вся биосфера в целом, поскольку требует учета такого же большого количества переменных и параметров, описывающих функционирование отдельных подсистем и элементов (только на ином масштабном уровне). Поэтому исследователи ищут разумный компромисс: при составлении моделей многие параметры берутся агрегировано, допускаются разного рода аппроксимации и гипотезы, многие коэффициенты принимаются «по аналогии» с другими объектами и т. д. Поскольку среди допущений и предположений трудно выбрать наилучшее, снижаются точность и познавательная ценность моделей, а следовательно, их практическая применимость.

Методы построения имитационных моделей чаще всего основываются на классических принципах системной динамики Дж. Форрестера [1; 4]. Создание имитационных моделей сопряжено с большими затратами. Так, модель ELM (злаковой экосистемы, используемой под пастбище) строилась семь лет с годовым бюджетом программы в 1,5 млн долларов около 100 научными сотрудниками из более 30 научных учреждений США, Австралии и Канады [10].

По степени точности предсказания оператора *F* модели делятся на детерминированные (или детерминистские) и стохастические.

Если предыдущее состояние системы однозначно определяет последующее состояние, то система или модель называется ***детерминистской.*** В качестве примера можно привести модели, описанные с помощью дифференциальных уравнений. Если, зная состояние системы в данный момент времени, можно лишь указать вероятность наступления того или иного состояния в следующий момент времени, то система называется ***стохастической,*** или ***вероятностной.*** Для описания и исследования таких систем применяется математический аппарат теории случайных процессов.

Детерминированные модели точно дают значения переменных состояния $X_1(t)\ldots X_n(t)$, причем каждому моменту времени t соответствует только одно значение X. Модели в физике в основном такие.

Стохастические модели в любой момент времени (или при любой дозе фактора) дают несколько значений X_i, точнее – распределение значений. Так и будет, если в основу моделей положить факт изменчивости живых организмов. Обычно назначение таких моделей – отразить изменчивость, характерную для живых систем. Серия реальных экспериментов (со всей их стохастичностью (изменчивостью)) позволяет найти общий закон – фактически детерминистскую модель. Один про-

стой пример такой модели, соответствующий детерминистской модели экспоненциального роста, задается уравнением

$$\frac{dy}{dt} = \big(a + b(t)\big) \times y,$$

где y – плотность популяции в момент времени t; a – константа; $b(t)$ – случайная переменная с нулевым средним. Это значит, что величина $b(t)$ меняется, принимая значения из некоторого случайного распределения так, что между флуктуациями в последовательные моменты нет никакой корреляции. Легко видеть, что если основой для имитации служит стохастическая модель, то результаты имитации будут различаться, даже если константы и начальные условия одинаковы. Эту вариабельность обеспечивают вероятностные элементы модели; назначение таких моделей именно в том и состоит, чтобы отразить изменчивость, характерную для живых организмов и экологических систем.

По степени приближения к равновесному состоянию системы выделяют статические и динамические модели.

Статические модели не включают переменную времени (t). Все, что зависит от времени в такой модели, игнорируют. Следовательно, это только приближение к реальности, допущение, так как все меняется во времени. Эти модели используют, когда система находится в равновесии со средой или внешние условия можно считать неизменными. Например, модель крыши, которая давит на здание, или модель поглощения светового потока листом (условие – лист не реагирует на изменение светового потока) – эта статическая модель, которая является элементом динамической модели роста растений.

К ***динамическим*** можно отнести все модели, в которых рассматриваются различные параметры биосистем в динамике от времени или другой независимой величины.

Основные характеристики динамических моделей состоят в том, что экологическая система рассматривается в динамике во времени, т. е. происходит изменение количественных характеристик (численности, биомассы) в динамике, описываемой непрерывными функциями.

Трудности динамических моделей заключаются в том, что не всегда легко предсказать поведение даже самых простых моделей. Достаточно лишь одной нелинейности и двух петель обратной связи, чтобы поведение модели стало «контринтуитивным», т. е. противоречило нашим интуитивным представлениям о системе. С другой стороны, ничего не стоит построить модель, не совпадающую с действительностью или неустойчивую. Еще одна трудность связана с тем, что для выяснения механизма функционирования модельной системы обычно необходимо провести много специальных экспериментов с моделью. Например, всегда приходится проверять поведение модели в ответ на

одновременное изменение двух или более входных переменных и только в редких случаях достаточно проверить реакцию на изменение лишь одной переменной.

По характеру описания во времени различают ***дискретные*** и ***непрерывные*** модели. Первые описывают поведение системы в фиксированные моменты времени, а вторые помогают рассчитать значения переменных для любой точки интервала ($t_0 \rightarrow t_n$).

По характеру описания строения системы в пространстве бывают ***точечные*** и ***пространственные*** математические модели. В точечных переменные состояния зависят только от времени $X_i(t)$, а в пространственных нужно учесть еще и трехмерность нашего пространства.

4.2.3. Элементы математической модели

Создание математических моделей является частью современных научных исследований. В любом случае, необходимо четко сформулировать проблему, установить цели исследования и обосновать подход к моделированию.

При решении разных задач в сельском хозяйстве и экологии часто используют динамические детерминированные модели. Их строят на допущении, что в любой момент времени можно количественно определить состояние системы. В таких моделях обязательно должны быть переменные состояния, переменные скорости, вспомогательные переменные, управляющие переменные, параметры и константы.

Переменные состояния (или *«фазовые переменные»*) – величины, описывающие состояние системы в любой заданный момент времени. Например, биомасса (масса сухого вещества растений), площадь поверхности листьев, численность особей популяции, количество азота в почве, т. е. это то, что можно измерить.

При построении модели в число переменных состояния следует включать те количественные характеристики или свойства системы, которые реально можно измерить, которые информативны и представляют интерес для исследователя.

Опишем систему через q переменных состояния $X_1, X_2 \ldots X_q$. Модель будет проще, если они независимы друг от друга, т. е. ни одна из переменных не может быть численно определена через значения других. Пусть площадь поверхности листьев A связана с биомассой растения W четким соотношением: $A = kW$ (k – постоянный коэффициент). Тогда в качестве независимой переменной состояния может выступать только какая-либо одна из названных характеристик. Численные значения переменных $X_1, X_2 \ldots X_q$ единственным образом опишут систему в момент времени q.

Основная проблема динамического детерминированного моделирования – это построение дифференциальных уравнений, чтобы можно

было прогнозировать значения всех переменных состояния в любой заранее заданный момент времени.

Переменные скорости – это величины, характеризующие скорость изменения переменных состояния. Они определяют интенсивность изменения переменных состояния за промежуток времени. Это отношение величины к единице времени (например, N/t). Переменную времени нельзя измерить мгновенно, как переменную состояния, обязательно нужен интервал времени. К примеру, это темп роста, интенсивность фотосинтеза, скорость распада белка.

Переменные скорости находят расчетными методами, определив переменные состояния в разные моменты времени.

Часто самые существенные предположения модели относятся к виду зависимости скорости процесса от переменных состояния.

В большинстве динамических моделей желательно иметь ряд дополнительных *вспомогательных переменных* (кроме переменных состояния), которые способствуют более глубокому пониманию объекта и в отдельных случаях упрощают сопоставление результатов наблюдений. Так, если A – площадь поверхности листьев и W – масса сухого вещества растений – независимые переменные состояния, то, пользуясь соотношением $A/W = F_A$, можно вычислить индекс поверхности листьев, если это целесообразно для удобства моделирования.

Если мы описываем систему «корень – побег» и знаем сухую массу отдельно корня и побега, то можно рассчитать вспомогательную переменную: $W = W_k + W_n$ – полную массу сухого вещества.

Иногда вспомогательной переменной может быть скорость процесса (например, удельный темп роста).

Управляющие переменные (или *вынуждающие функции*) – это переменные, значения которых меняются во времени независимо от поведения изучаемой системы. Рост растений и животных – это результат управления со стороны окружающей среды, воздействие которой на определенных стадиях может рассматриваться как константа.

Управляющие переменные могут иметь характер переменной состояния (t, влажность) или переменной скорости (усвоение питательных веществ, выпадение атмосферных осадков, солнечная радиация) с размерностью «величина в единицу времени»: $E = E(t)$ – условия окружающей среды, зависящие от времени.

Параметры и константы – это не зависящие от времени количественные показатели и коэффициенты, включаемые в математические модели.

Константа – это точная численная величина, которая остается неизменной при варьировании условий эксперимента или при использовании модели для проверки различных гипотез (число секунд в сутках, молекулярная масса глюкозы и т. д.).

Параметр – это характеристика с меньшей определенностью значения, чем у константы, но она остается неизменной на протяжении одного прогона модели. Как пример можно указать эффективность фотосинтеза (в %), дыхательный коэффициент и т. д.

На параметры влияют условия эксперимента, генотип. Иногда в модель включают малоизученные параметры, если надо уточнять их значения, сравнивая данные модели с результатами экспериментов (этот процесс называют калибровкой модели).

Для обозначения множества параметров и констант используют символ *P*.

4.2.4. Блок-схема математической модели (по Дж. Форрестеру)

Математические модели могут отображать данную систему лишь с той степенью точности, с какой уравнения, описывающие свойства компонентов модели, отображают свойства компонентов реальной системы.

Одна из привлекательных особенностей динамических моделей заключается в возможности использования диаграммы связей для представления основных взаимодействий в сложной системе.

Условные обозначения (рисунок 8) для динамических моделей предложены Дж. Форрестером в 1971 г. для промышленных систем.

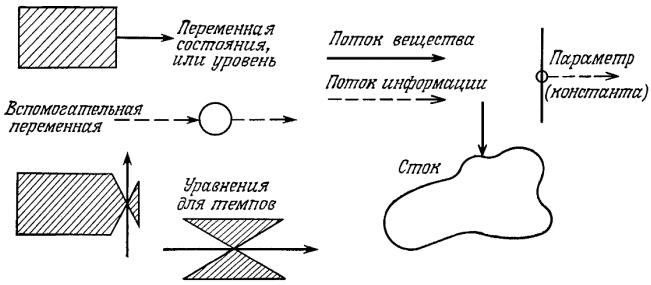


Рис. 8. **Условные обозначения, предложенные Дж. Форрестером для изображения взаимодействия в системе**

Регулирование скорости потока показывается знаком вентиля.

Рисунок 9 иллюстрирует пример использования этих символов для описания экспоненциального и логистического роста.

При экспоненциальном росте количество *N* регулируется темпом роста, который, в свою очередь, зависит от относительного темпа роста (биотический потенциал), считающегося константой, и начального значения *N*. При логистическом росте *N* регулируется темпом

роста, который зависит от текущего значения N и двух констант – относительного темпа роста и емкости среды обитания.

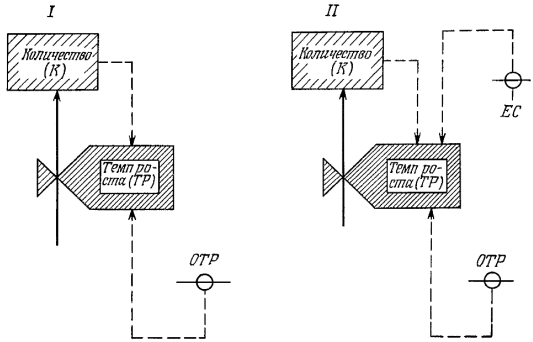


Рис. 9. **Графическая модель экспоненциального (*I*) и логистического (*II*) роста численности популяции *N***

Еще один пример использования условных обозначений Дж. Форрестера – диаграмма роста дрожжей в смешанной культуре (рисунок 10).

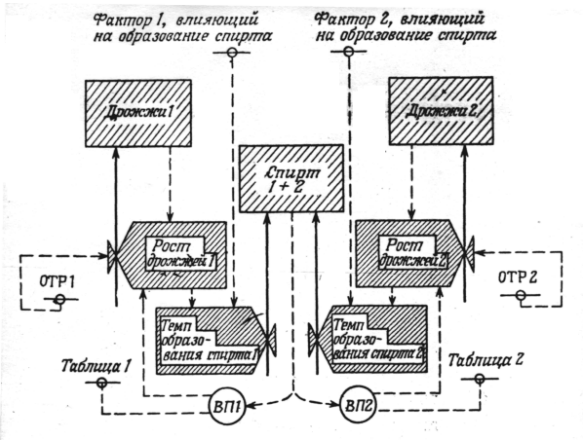


Рис. 10. **Диаграмма связей для роста и взаимного влияния двух видов дрожжей**

Таким образом, предложенные Дж. Форрестером условные обозначения приемлемы для описания процессов в экологии.

Список литературы

1. *Гильманов, Т. Г.* Математическое моделирование биогеохимических циклов в травяных экосистемах / Т. Г. Гильманов. – М.: МГУ, 1978. – 169 с.

2. *Джефферс, Дж.* Введение в системный анализ: применение в экологии / Дж. Джефферс; пер. с англ. Д. О. Логофета; под ред. и с предисл. Ю. М. Свирежева. – М.: Мир, 1981. – 256 с.

3. *Дулепов, В. И.* Системная экология: учебное пособие / В. И. Дулепов, О. А. Лескова, И. С. Майоров; под ред. Л. И. Александровой. – Владивосток, 2004. – 209 с.

4. *Крапивин, В. Ф.* Математическое моделирование глобальных биосферных процессов / В. Ф. Крапивин, Ю. М. Свирежев, А. М. Тарко. – М.: Наука, 1982. – 270 с.

5. *Крестин, С. В.* Двухмерная модель «цветения воды» в водохранилище равнинного типа / С. В. Крестин, Г. С. Розенберг // Известия СамНЦ РАН. – 2002. – Т. 4, № 2. – С. 276–279.

6. *Крестин, С. В.* Об одном механизме «цветения воды» в водохранилище равнинного типа / С. В. Крестин, Г. С. Розенберг // Биофизика. – 1996. – Т. 41, вып. 3. – С. 650–654.

7. Основы кибернетики предприятия: индустриальная динамика / Дж. Форрестер [и др.]. – М.: Прогресс, 1971. – 340 с.

8. *Петракова, Н. В.* Основы математического моделирования. Модели. Методы. Примеры / Н. В. Петракова. – Брянск: Изд-во Брян. ГСХА, 2011. – 162 с.

9. *Пузаченко, Ю. А.* Математические мотоды в экологических и географических исследованиях: учебное пособие для студентов вузов / Ю. А. Пузаченко. – М.: Академия, 2004. – 416 с.

10. *Розенберг, Г. С.* Модели в фитоценологии / Г. С. Розенберг. – М.: Наука, 1984. – 256 с.

11. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии: учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: СамНЦ РАН, 2000. – 396 с.

12. *Смиряев, А. В.* Моделирование: от биологии до экономики: учебное пособие для студентов специальности «Селекция и генетика сельскохозяйственных культур» / А. В. Смиряев, А. В. Исачкин, Л. К. Харрасова. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 122 с.

13. *Форрестер, Дж.* Мировая динамика / Дж. Форрестер. – М.: Наука, 1978. – 167 с.

14. *Форрестер, Дж.* Основы кибернетики предприятия (индустриальная динамика) / Дж. Форрестер. – М.: Прогресс, 1971. – С. 340.

4.3. Принципы построения математических моделей в экологии

4.3.1. Линейное и нелинейное программирование

Линейное программирование применяется, если при увеличении или уменьшении аргумента X пропорционально изменяется функция Y. Линейная функция – функция вида $Y = kX + b$. Основное свойство линейных функций – приращение функции пропорционально приращению аргумента. Графиком линейной функции является прямая линия, с чем и связано ее название.

Сфера использования линейного программирования предусматривает линейность целевой функции и ограничений, т. е. предполагается пропорциональная зависимость между величинами. Например, два трактора сделают вдвое больше работы, чем один, а в двух килограммах сена содержится в два раза больше питательных веществ, чем в одном, и т. д.

Линейное программирование является составной частью более общего метода – математического программирования, которое позволяет находить наилучшие планы распределения ограниченных ресурсов для достижения требуемой цели – решения задачи. Линейное программирование может быть использовано как один из методов оптимизации решения. Наилучший результат здесь достигается не за счет выделения дополнительных сил и средств или иных ресурсов, а за счет их рационального распределения.

Линейная зависимость является наиболее удобной для расчетов и интерпретации, к которой исследователи стремятся свести каждую найденную закономерность, но, к сожалению, чрезвычайно редко встречающейся в реальном мире.

Реальный мир в подавляющем большинстве случаев объективно нелинеен. В ряде случаев вид аппроксимирующего уравнения заранее предполагается из некоторых теоретических соображений. Если этого нет, то одному и тому же конечному результату будет соответствовать значительное множество вариантов расчетных формул. Возникает необходимость выбора регрессионного уравнения оптимальной сложности.

Вместе с тем нелогично описывать простыми алгебраическими функциями динамику рядов биологических показателей, характеризующихся «горбами», перегибами и прочими нестационарными атрибутами. В этом случае сложность модели для сложных объектов принципиально необходима.

Оптимизационные задачи, в которых либо целевая функция, либо ограничения, либо и то и другое нелинейны, получили название задач нелинейного программирования. Для них, к сожалению, нет столь хоро-

шо разработанных методов решения, как в линейном программировании. Поэтому точное решение удается отыскать далеко не всегда.

Чтобы понять, с чем это связано, прежде всего выясним, на чем может отразиться нелинейность задачи. Если нелинейны ограничения, то область U (область допустимых решений) может оказаться невыпуклой (область называется выпуклой, если вместе с каждыми двумя точками области ей принадлежит и весь отрезок, их соединяющий (рисунки 11, 12)).

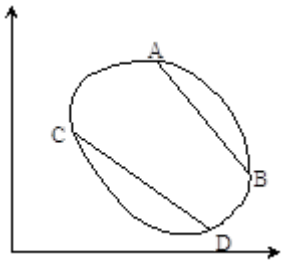


Рис. 11. **Выпуклая область (любой отрезок вместе с крайними точками целиком принадлежит области решений)**

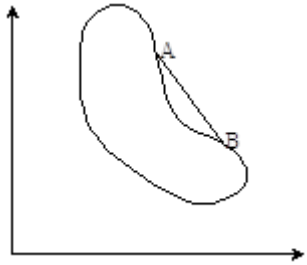


Рис. 12. **Невыпуклая область (отрезок *AB* не принадлежит области решений)**

В задачах линейного программирования такого явления быть не могло, так как многогранник ограничений всегда выпуклый с конечным числом «крайних» точек, в которых следует искать решение. А сохраняется ли в нелинейных задачах второе из этих свойств – конечность числа «крайних» точек? Оказывается, что тоже нет. На рисунке 13 приведен пример невыпуклой области с бесчисленным множеством «крайних» точек (каждая точка дуги *ASB* «крайняя»).

Не меньше неприятностей доставляет и нелинейность целевой функции. Именно из-за нее функция может достигать экстремума (*max* или *min*) не в «крайней» точке области U, а где-нибудь внутри, может иметь несколько локальных (местных) экстремумов, например, в точках $u = u_1$ и $u = u_2$ (точка называется точкой локального экстремума, если в ней значение функции больше, чем значение этой функции в достаточно малой окрестности точки) (рисунок 14).

Нелинейное программирование – раздел математического программирования, изучающий методы решения экстремальных задач с нелинейной целевой функцией и/или областью допустимых решений, определенной нелинейными ограничениями. В экономике это соответствует тому, что результаты (эффективность) возрастают или убывают непропорционально изменению масштабов использования ресурсов (или, что

то же самое, масштабов производства), например, из-за деления издержек производства на предприятиях на переменные и условно-постоянные, из-за насыщения спроса на товары, когда каждую следующую единицу продать труднее, чем предыдущую, и т. д.

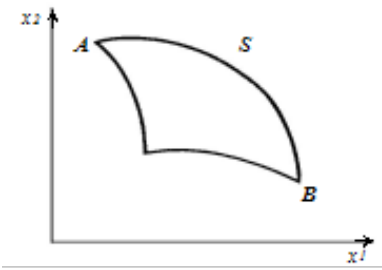


Рис. 13. **Невыпуклая область с бесчисленным множеством крайних точек – каждая точка дуги *ASB* крайняя**

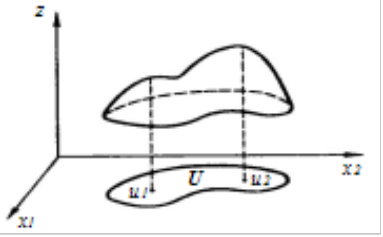


Рис. 14. **Нелинейная целевая функция может иметь несколько экстремумов внутри области *U*. Здесь при $u = u_1$ и $u = u_2$ (обе точки внутренние) функция имеет локальные максимумы**

4.3.2. Дифференциальные уравнения в динамических моделях

Пусть необходимо из точки *A* попасть в точку *K* за время *t*. Самый простой способ – иметь постоянную скорость, т. е. двигаться из начальной точки в точку *K* прямолинейно и равномерно. Тогда график движения будет представлять собой прямую.

Реальное движение обычно непостоянно по скорости. В каждый промежуток времени скорость отличается (рисунок 15).

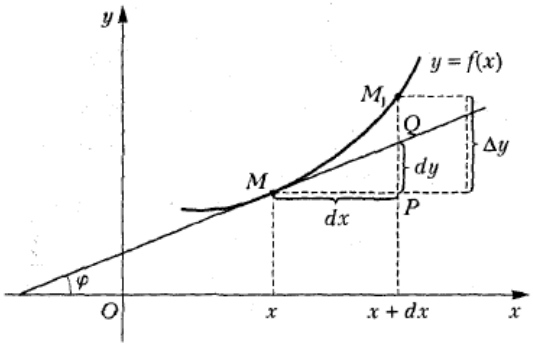


Рис. 15. **График скорости движения – дуга MM_1**

Пусть изогнутая линия MM_1 на рисунке 15 показывает изменение скорости процесса. Чтобы находить скорость в каждый момент времени, нужно двигаться точно по графику (на рисунке $y = f(x)$). Точность определения скорости будет выше, если мы раздробим время (обозначим по оси x) на малые отрезки, т. е. будем двигаться к пределу $\Delta x \to 0$. График движения – кривая, тогда скорость – это касательная к реальному графику движения.

В треугольнике MPQ катеты MP и PQ представляют, соответственно, время и путь, пройденный за это время (или количество приросшей биомассы, или число появившихся особей в популяции), гипотенуза MQ представляет собой скорость в виде прямой с определенным значением для данного интервала времени. Таким образом, по теореме Пифагора можно найти приблизительную скорость процесса. Оценка получается приблизительной, так как кривую изменения скорости заменяли прямыми – касательными к реальному графику.

Существует процедура, позволяющая точно находить мгновенную скорость процесса, – дифференцирование. Число, которое получается в результате дифференцирования, – производная 1.

Рассмотрим модель роста листа, которая кроме площади поверхности и массы сырой ткани включает в качестве переменных состояния содержание сахарозы S_u и крахмала S_t. Тогда дифференциальное уравнение для содержания сахарозы можно записать в виде

$$\frac{dS_u}{dt} = P_g + kS_t - (S_u - C)/r \,,$$

где k, C и r – параметры; P_g – интенсивность фотосинтеза в листе.

Величина P_g определяется освещенностью окружающей среды и в зависимости от модели может быть либо константой, либо управляющей переменной. Второе слагаемое обозначает превращение крахмала в сахарозу, последнее слагаемое – выведение сахарозы из листа.

Обычно каждое из дифференциальных уравнений содержит только несколько переменных состояния, параметров и характеристик окружающей среды. Если особый интерес представляет реакция роста листа в зависимости от температуры, то в уравнение можно ввести параметр распада крахмала K и представить его зависимым от температуры.

4.3.3. Численное интегрирование в математических моделях

Дифференциальные уравнения очень редко могут быть решены аналитически; почти всегда приходится пользоваться численными методами.

Скорость – это изменение показателя за время. Отложим на оси X время, по оси Y – скорость изменения показателя (числа особей, био-

массы, пути и т. д.). Разобьем ось *X* на маленькие интервалы. Кривую скорости представим как цепь разбиений с равной скоростью (рисунок 16).

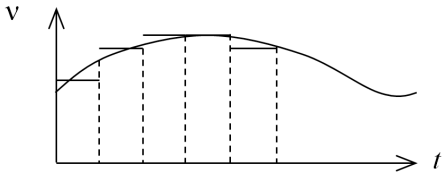


Рис. 16. **Представление кривой скорости в виде отрезков с равной скоростью**

Как найти, какой путь пройден или сколько особей появилось на микроинтервале? Надо время (интервал на оси *X*) умножить на скорость (интервал на оси *Y*): время × скорость = пройденный путь. Так же на втором, третьем и т. д. микроинтервалах. На графике это равносильно нахождению площади прямоугольника (длина × ширина = площадь). Сложение площадей столбиков даст нам примерную оценку количества особей, появившихся за промежуток времени *t*.

Оценка получается примерная, так как неровные столбики заменяли прямоугольниками. Если двигаться к пределу ($\Delta t \to 0$), то погрешность уменьшается.

Площадь под кривой скорости равна пути (числу особей, биомассе), пройденному за период времени. Легко находить площадь только прямоугольника либо фигуры, производной от него, – прямоугольного треугольника (рисунок 17).

Процедура, позволяющая точно определить площадь неправильной фигуры, – интегрирование. Результатом интегрирования является интеграл. За верхний предел интегрирования можно принимать разные моменты времени → каждому моменту будет соответствовать свое значение плащади (*S*).

Интегрирование – это восстановление функции по ее производной (обратное действие по отношению к дифференцированию).

Площадь *S* криволинейной трапеции *abcd* равна приращению первообразной на отрезке *ab*, т. е.

$$S' = F(b) - F(a).$$

Для любой функции *f* на отрезке *ab S* стремится к некоторому числу. Это число называется интегралом функции *f*, т. е.

$$S = \int_a^b f(x)\,dx.$$

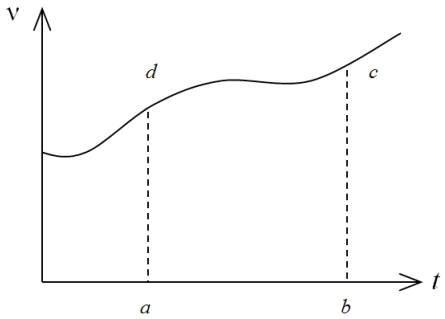


Рис. 17. **Криволинейная трапеция, ограниченная кривой скорости**

4.3.4. Вероятностные модели

Рассмотренные выше модели были детерминистическими, т. е. в них не учитывались случайные эффекты и их влияние на изучаемые процессы, например, на изменение численности популяции или прироста биомассы. Детерминистические модели не всегда служат достаточно точным отражением реальности в биологии и в других областях знаний. Это объясняется двумя причинами.

Во-первых, они предполагают большую численность популяции. Настолько большую, что можно опираться на закон больших чисел. Одно из следствий этого закона используется в генетике: при достаточно большом объеме выборки из большой популяции F_2, полученной из F_1 ($AA \times aa \rightarrow F_1$), соотношение особей с доминантным и рецессивным проявлениями признака близко к 3:1. Это удачная детерминистическая модель – закон Менделя, который, кроме прочих предположений, требует большой объем выборки в F_2. В реальных экспериментах, всегда ограниченных по объему, уже по этой причине наблюдается отклонение от модели 3:1.

Теория вероятностей и основанная на ней математическая статистика предоставляют возможность использовать стохастические варианты моделей и методов. Они, в частности, позволяют ответить на вопрос о том, можно ли считать отклонение от детерминистической модели 3:1, обнаруженное в ограниченной выборке, чисто случайным, естественным или, все-таки, отклонение вызвано другими генетическими причинами (отбор, миграция и т. п.). Ответ всегда дается в вероятностной форме. Например, с помощью известного критерия χ^2 можно получить вывод: с вероятностью (P) менее 0,05 (5 %) обнаруженное отклонение от 3:1 вызвано случайной ошибкой выборочности. Значит, отклонение в действительности вызвано какими-то особыми, неслучайными факторами.

Вторая причина, по которой необходимо применять стохастические модели, особенно в сельском хозяйстве, – это необходимость учета влияния неконтролируемых случайных колебаний условий выращивания. Часто влияние этих колебаний даже перекрывает влияние на урожай самих генотипов сравниваемых сортов. Для генетиков, селекционеров, сортоиспытателей крайне важно грамотно применять стохастические модели и методы. Проводится n одинаковых испытаний, и если в каждом вероятность события B равна p, то вероятность того, что событие B ни разу не произошло, равна $(1 - p)(1 - p)\ldots(1 - p) = q^n$, где $q = 1 - p$. Вероятность противоположного события «хотя бы один раз событие B произошло» равно: $1 - q^n$.

Пример 1. Оценить вероятность того, что среди восьми особей потомства F_2 от скрещивания белой (cc) и серой (CC) мыши будет хотя бы одна белая (C – доминантный аллель).

Сначала оценим вероятность того, что в F_2 не будет ни одной белой мыши. Так как доля серых мышей в F_2 составляет ¾ ($CC + Cc$), то искомая вероятность будет $(¾)^8 \approx 0{,}1$. Теперь можно определить вероятность того, что будет хотя бы одна белая мышь: $1 - 0{,}1 = 0{,}9$. Эта вероятностная модель имеет и детерминистическую формулировку: среди большого числа семей F_2 с 8 потомками в 90 % семей будет хотя бы одна белая мышь (в 10 % таких семей – ни одной белой мыши).

Пример 2. Частота спонтанной мутации альбинизма у растений 10^{-5}. Сколько зерен надо высадить, чтобы с вероятностью 0,95 среди них было хотя бы одно альбиносное растение?

Схема решения: $(1 - p)^n$ – вероятность того, что нет ни одного мутанта среди n растений; $1 - (1 - p)^n = 0{,}95$ – хотя бы одно мутантное растение есть.

Из последнего равенства при $p = 10^{-5}$ можно найти n. В данном случае оно приблизительно равно 300 000.

Пример 3. Вероятность рождения мальчика и девочки равна: $p = q = 1/2$. Сколько нужно планировать детей в семье, чтобы вероятность иметь хотя бы одного мальчика была более 0,9?

Схема решения: $P = (1/2)^n$ – из n детей все девочки; $1 - (1/2)^n > 0{,}9$ – хотя бы один мальчик. Отсюда $(1/2)^n < 0{,}1$. Это неравенство справедливо уже при $n = 4$.

4.3.5. Теория мишени

В некоторых областях биологии удобно пользоваться так называемой теорией мишени. Согласно ей каждая клетка, организм и ген представляют собой мишень, а происходящие с ними изменения – результат случайных ударов (попаданий) при бомбардировке этих мишеней. Эту теорию широко применяют для оценки эффективности воздействия ин-

дуцированного ионизирующего излучения на живые организмы. Она естественным образом была расширена и для объяснения «спонтанных» вредных изменений, в частности изменений, связанных с процессами старения, а также действия различных факторов, помимо ионизирующего излучения.

Предположим, что клетка содержит несколько мишеней (мутирующих генов), и попадание нейтрона в любую из них с известной вероятностью вызывает заметный эффект у потомства (мутацию). Какая доля из клеток популяции после облучения с определенной дозой (бомбардировка нейтронами) будет иметь хотя бы один мутантный ген, а какая – ни одного?

Пример 1. Половозрелое гаплоидное насекомое (например, трутень) облучается рентгеновскими лучами. Предположим, что в каждой клетке содержится N генов, каждый из которых существен для ее нормального функционирования. Как зависит от дозы доля клеток, перестающая нормально функционировать в результате облучения, т. е. доля клеток с явными мутациями?

Схема решения: каждая клетка содержит N мишеней и подвергается действию дозы в k частиц. Пусть вероятность того, что определенная частица «попадет в определенную мишень» (вызовет мутацию гена), равна p. Понятно, что p очень мало. Вероятность того, что данная мишень не будет поражена данной частицей, равна $1 - p$. Следовательно, вероятность того, что данная мишень не будет поражена ни одной из k частиц, равна $(1 - p)^k$. Если p мало, а k – велико, то удачной является следующая приблизительная замена: $(1 - p)^k \approx e^{-kp}$.

4.3.6. Матричная модель

Термин «матричные модели» применяется для обозначения прямоугольной таблицы чисел:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 5 & 7 & -2 \\ 4 & 1 & 3 \end{bmatrix}.$$

В матрице важны строки и столбцы. Каждое из этих девяти чисел называется элементом матрицы. Матрица как целое обозначается большими латинскими буквами: A (B, C, D …). Элементы матрицы обозначают следующим образом: a_{ij} – это элемент i-й строки j-того столбца.

Различают разные типы матриц.

Матрица с одинаковым числом строк и столбцов называется квадратной:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{33} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}.$$

$I = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ – нулевая матрица.

$I = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ – единичная матрица.

$I = \begin{bmatrix} 3 & -2 \\ -2 & 3 \end{bmatrix}$ – симметричная матрица.

$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}$ – вектор-строка.

$A = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$ – вектор-столбец.

Записывать массивы чисел в виде матриц удобно, потому что это позволяет выполнять с ними математические действия.

Сложение или вычитание двух матриц представляет собой сложение или вычитание всех соответствующих элементов этих матриц. При умножении матрицы на число необходимо умножить число на каждый из элементов матрицы.

Необходимость сложения матриц может возникнуть, если, например, одноименную задачу решили для каждого из подразделений предприятия, а затем получили результат для предприятия в целом. Суммой матриц *A* и *B* будет матрица *C*, элементы которой равны сумме соответствующих элементов матриц *A* и *B*. Действия сложения распространяются на матрицы одного порядка.

Необходимость умножения матриц может возникнуть при требовании увязать многие отрасли, когда для получения конечного продукта одной отрасли требуется продукция нескольких других. При умножении матриц А и В получим матрицу *C*, в которой элемент, стоящий на пересечении строки *i* и столбца *j*, получается путем умножения элементов *i*-той строки матрицы *A* на элементы *j*-го столбца матрицы *B* и сложения полученных произведений.

4.3.7. Предсказание возрастной структуры популяции. Матрицы Лесли

Первая матричная модель экологических систем была создана Л. Лесли как детерминистическая модель, предсказывающая будущую возрастную структуру популяции самок по известной структуре в настоящий момент времени, по гипотетическим коэффициентам выживания p и плодовитости f [6]. Модель представлена матричным уравнением:

$$\begin{bmatrix} f_0 & f_1 & \dots & f_n \\ p_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} nt*1 \\ nt*2 \\ nt*3 \\ nt*4 \\ nt*n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} nt+1*0 \\ nt+2*1 \\ nt+3*2 \\ nt+4*3 \\ nt+5*n \end{bmatrix}.$$

Согласно этому уравнению, численность животных возрастных классов в момент времени $t + 1$ можно получить, умножив численности возрастных классов в момент времени t на матрицу, элементами которой являются коэффициенты плодовитости и выживания для каждого возрастного класса.

Пусть исходная популяция состоит из одной самки старшего возраста. По окончании одного временного интервала в популяции будет уже 12 самок младшего возраста, так как:

• каждое животное старшего возраста, прежде чем умереть, успевает произвести 12 потомков;

• каждое животное среднего возраста, прежде чем перейти в следующий возрастной класс или умереть (вероятности этих событий одинаковы), дает в среднем 9 потомков;

• молодые животные с вероятностью 1/3 попадают в среднюю группу.

Повторное применение модели, когда вектор умножают на коэффициенты плодовитости и выживания, дает следующие результаты:

$$\begin{bmatrix} 0 & 9 & 12 \\ 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$[M] * \begin{bmatrix} 12 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix}, \; [M] * \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 36 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \; [M] * \begin{bmatrix} 36 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 24 \\ 12 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

4.3.8. Марковские модели

Марковские случайные процессы названы по имени выдающегося русского математика А. А. Маркова (1856–1922), впервые начавшего изучение вероятностной связи случайных величин и создавшего теорию, которую можно назвать «динамикой вероятностей». В дальнейшем основы этой теории явились исходной базой общей теории случайных процессов и таких важных прикладных наук, как теория диффузионных процессов, теория надежности, теория массового обслуживания и т. д. В настоящее время теория марковских процессов и ее приложения широко применяются в самых различных областях механики, физики, химии и др.

Благодаря сравнительной простоте и наглядности математического аппарата, высокой достоверности и точности получаемых решений, особое значение марковские процессы приобрели у специалистов, занимающихся исследованием операций и теорией принятия оптимальных решений.

Несмотря на указанную выше простоту и наглядность, практическое применение теории марковских цепей требует знания некоторых терминов и основных положений, на которых следует остановиться.

Марковские случайные процессы относятся к частным случаям случайных процессов (СП). В свою очередь случайные процессы основаны на понятии случайной функции (СФ).

Случайной называется функция, значение которой при любом значении аргумента является случайной величиной, или функция, которая при каждом испытании принимает какой-либо заранее неизвестный вид. Примеры СФ: колебания напряжения в электрической цепи, скорость движения автомобиля на участке дороги с ограничением скорости, шероховатость поверхности детали на определенном участке и т. д.

Как правило, считают, что если аргументом СФ является время, то процесс, основанный на такой функции, называют случайным. Существует и другое, более близкое к теории принятия решений определение СП. При этом под случайным процессом понимают процесс случайного изменения состояний какой-либо физической или технической системы по времени или какому-либо другому аргументу.

Основной конструкцией марковских моделей служит матрица, элементы которой равны вероятностям перехода системы из одного состояния в другое за определенные промежутки времени. Эта матрица, таким образом, похожа на матрицы, использующиеся в матричных моделях, за исключением того, что суммы вероятностей по всем строкам равны 1.

Марковская модель первого порядка – это модель, в которой будущее развитие системы определяется ее текущим состоянием и не зависит от того, каким путем система пришла в это состояние. Последова-

тельность результатов, получаемых из такой модели, часто называют марковской цепью. Применение этой модели к практическим ситуациям требует выполнения трех основных условий:

1. Система должна допускать классификацию на конечное число состояний.

2. Переходы должны происходить в дискретные моменты времени, правда, эти моменты могут быть достаточно близкими, чтобы для моделируемой системы время можно было считать непрерывным.

3. Вероятности не должны меняться со временем. Возможны и некоторые модификации этих условий, однако ценою возрастания математической сложности модели.

Экологический смысл этих понятий схематически иллюстрируется на рисунке 18, где показана типичная сукцессия; каждая стадия этой сукцессии определяется характеристиками доминирующих на данной стадии типов растений. Как показывает диаграмма, переходным множеством состояний является множество, каждое состояние которого может в конце концов быть достигнуто из любого другого состояния этого множества, но которое покидается навсегда, если система переходит в замкнутое множество состояний либо в поглощающее состояние.

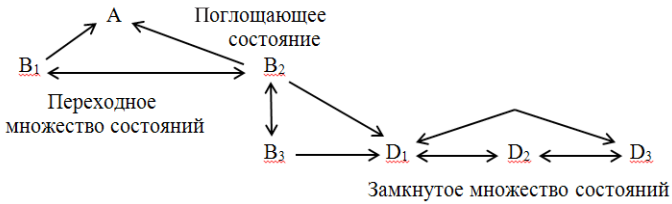


Рис.18. **Схема экологической сукцессии**

Замкнутое множество состояний отличается от переходного тем, что оно не может быть покинуто, если система перешла в одно из состояний замкнутого множества. Поглощающим является состояние, которое, будучи достигнуто, уже не покидается, т. е. в нем происходит полное самозамещение. Тогда среднее время первого достижения соответствует среднему времени, необходимому для наступления конкретной стадии сукцессии, а среднее время поглощения – среднему времени достижения устойчивой композиции.

Для построения моделей марковского типа необходимы:

1. Некая разумная классификация состояний сукцессии по определимым категориям.

2. Данные для определения переходных вероятностей или скоростей, с которыми состояния переходят со временем из одной категории этой классификации в другую.

3. Данные о начальных условиях.

Если изучаемые системы проявляют марковские свойства, из анализа модели можно получить ряд интересных и важных выводов, например:

1. Алгебраический анализ переходной матрицы выявляет существование переходных множеств состояний, замкнутых множеств состояний или поглощающих состояний. Дальнейший анализ позволяет разбить переходную матрицу на блоки, которые исследуются по отдельности, что упрощает изучение экологической системы.

2. Анализ переходной матрицы позволяет вычислить среднее время перехода от одного состояния к другому и среднюю длительность пребывания в конкретном состоянии, если оно достигается.

3. Когда существуют замкнутые или поглощающие состояния, можно вычислить вероятность пребывания в замкнутом множестве или среднее время поглощения.

Преимущества моделей марковского типа:

• такие модели довольно легко строить на основе данных по сукцессиям;

• не требуют глубокого понимания внутренних механизмов динамических изменений в системе, но могут помочь выявить те области, где такое понимание имело бы важное значение, и, следовательно, выступают как ориентир и стимул для дальнейшего исследования;

• результаты анализа марковских моделей легко представить графически, что делает их более наглядными и понятными специалистам по управлению ресурсами;

• вычислительные процедуры при исследовании марковских моделей относительно несложные.

Недостатки марковских моделей:

• отсутствие зависимости от функциональных механизмов снижает их привлекательность для экологов, склонных к функциональному подходу;

• в отдельных случаях имеющихся данных недостаточно для того, чтобы достоверно оценить вероятности или скорости переходов, особенно если эти переходы происходят редко;

• трудно оценить изменения в экосистемах, охватывающих достаточно длительное время.

Рассмотрим сукцессионные изменения на верховых болотах, которые часто можно наблюдать в результате усиления дренирования. В таблице 14 приведены оценки вероятностей переходов между четырьмя возможными состояниями за период в двадцать лет. Первое состояние соответствует наиболее влажной стадии, в которой доминирует Sphagnum, а также представители сосудистых растений, в основном Calluna vulgaris, Erica tetralix и Eriophorum vaginatum. Состояние 2 отвечает бо-

лее сухой стадии с ассоциацией Callur, Cladonia и проростками Betula и Pinus sylvestris. Состояние 3 соответствует более или менее укоренившемуся лесу из Betula и Pinus sylveslris, причем для более зрелого леса типично сообщество Vaccinium myrtillus со мхами. Состояние 4 соответствует стадии, на которой более сухие фации спорадически выедаются крупными травоядными, в результате чего закрепляется ассоциация, где доминирует Molinia – Pteridium.

Таблица 14

Переходные состояния сукцессионных изменений на верховом болоте

Начальное состояние	Вероятность перехода в конечное состояние			
	1	2	3	4
1. Болото	0,65	0,29	0,06	0,00
2. Сосудистые растения	0,30	0,33	0,30	0,07
3. Лес	0,00	0,28	0,69	0,03
4. Пастбище	0,00	0,40	0,20	0,40

Итак, участки, характеризующиеся вначале типичным для болота комплексом растительности, с вероятностью 0,65 остаются по прошествии 20 лет в том же состоянии и с вероятностями 0,29 и 0,06 превращаются в сообщество, где доминирует Calluna, и в лес соответственно. Участки, на которых вначале доминирует Calluna, имеют примерно равные вероятности остаться в том же состоянии, вернуться к болоту из-за флуктуации уровня грунтовых вод или превратиться в лес; с малой вероятностью (0,07) они превращаются в участки, спорадически выедаемые крупными травоядными. Лесные участки с вероятностью 0,69 сохраняются как лес, с вероятностью 0,28 из-за вымирания деревьев возвращаются к состоянию, для которого типичным является Calluna, и по-прежнему с малой вероятностью (0,03) превращаются в участки, спорадически выедаемые крупными травоядными. Выедаемые участки с равной вероятностью подвергаются дальнейшему выеданию или возвращаются в состояние, где доминирует Calluna, и с вероятностью 0,20 превращаются в лес в результате развития невыеденных проростков.

Если матрицу вероятностей переходов последовательно возводить в степень до тех пор, пока каждая ее строка станет такой же, как и все остальные, образуя некоторый фиксированный вектор вероятностей, мы получим в результате так называемую регулярную переходную матрицу. Эта матрица показывает, до какой степени вероятность перехода из одного состояния в другое не зависит от начального состояния, а фиксированный вектор вероятностей дает стационарное распределение вероятностей всех состояний. В нашем примере этот вектор равен [0,2177 0,2539 0,3822 0,1462].

Таким образом, если вероятности переходов оценены правильно и остаются постоянными, данная экосистема достигнет в конце концов состояния равновесия, в котором примерно 22 % площади занято болотами и приблизительно по 25, 38 и 15 % занимают сообщество Calluna, лес и выедаемые крупными травоядными участки соответственно.

Если, как в нашем примере, поглощающие состояния отсутствуют, нас смогут заинтересовать также средние времена первого достижения любого состояния, т. е., например, среднее время, необходимое для того, чтобы болото превратилось в участок, где доминирует Calluna, в лес, выедаемый травоядными участок. С другой стороны, мы можем задаться вопросом, сколько времени понадобится для того, чтобы случайно выбранный участок превратился в болото, сообщество Calluna, в лес или выедаемый крупными травоядными участок; для этого нам понадобится найти средние времена первого достижения в равновесии.

В результате не очень сложных вычислений мы получим следующую матрицу средних времен первого достижения:

$$\begin{bmatrix} 0 & 3{,}561 & 7{,}197 & 31{,}688 \\ 9{,}566 & 0 & 5{,}237 & 28{,}755 \\ 13{,}672 & 4{,}107 & 0 & 29{,}178 \\ 18{,}673 & 9{,}107 & 5{,}000 & 0 \end{bmatrix}.$$

Поскольку каждый временной шаг равен 20 годам, среднее время, необходимое для того, чтобы участок, где преобладает Calluna, превратился в болото, составляет $9{,}566 \times 20 = 191$ г. Аналогичное среднее время, необходимое для превращения леса в участок, на котором преобладала Calluna, составляет $4{,}107 \times 20 = 82$ г. Таким же образом можно вычислить и все другие времена.

Наконец, зная матрицу времен и вектор вероятностей, легко найти вектор средних времен первого достижения равновесия:

$$[10{,}385 \quad 3{,}676 \quad 3{,}627 \quad 25{,}351].$$

И вновь, поскольку каждый временной шаг равен двадцати годам, среднее время, необходимое для того, чтобы случайно выбранный участок превратился в болото, составляет $10{,}385 \times 20 = 208$ лет, а чтобы он превратился в участок, на котором преобладает вид Calluna, в лес, участок, выедаемый травоядными, требуется в среднем 74, 73 и 507 лет соответственно.

Здесь, как и во многих других математических моделях, основные свойства модели дают дополнительную информацию о поведении моделируемой системы и тем самым позволяют избежать проведения длительных экспериментов, которые в противном случае было бы необходимо поставить.

4.3.9. Многомерные модели

По количеству задействованных переменных модели подразделяют на одномерные, в которых функция определена с помощью одной переменной, и многомерные, которые учитывают поведение более чем одной переменной.

Все многомерные модели делят на две основные группы:

• прогностические модели, в которых одни случайные величины используются для предсказания других;

• описательные модели, где все переменные одного типа и не делается попыток предсказать одно множество значений по другому.

Случайной называется величина, которая может принимать любое значение из определенного множества с какой-то определенной частотой или вероятностью.

Разработка прогностических моделей в зависимости от количества и качества включенных переменных основывается на использовании дискриминантного анализа, метода канонических величин, канонического анализа и др.

В описательных моделях с учетом того, какими (количественными или качественными) являются переменные, применяют метод взаимного осреднения, анализ главных компонент, кластерный анализ и др.

В качестве примера обозначим сущность некоторых из них.

Анализ главных компонент решает следующие задачи:

• анализ корреляций между отдельными переменными;

• выявление наиболее информативных переменных;

• установление индексов вариабельности переменных и др.

Анализ главных компонент основан на построении матрицы коэффициентов корреляции между изучаемыми переменными и нахождении основных параметров матрицы.

Кластерный анализ является методом обнаружения структуры связей в сложной совокупности данных. Задача кластерного анализа – объединение элементов данной системы в определенные группы-кластеры, чтобы элементы внутри одного кластера обладали высокой степенью схожести между собой, а сами кластеры достаточно отличались один от другого. Одним из вариантов представления результатов кластерного анализа является построение дендрограммы связей.

На рисунке 19 показано распределение 25 почв Лейк-Дистрикта (*pH*, количество экстрагируемого железа). Выявляется несколько тесно связанных кластеров (например, почвы 1, 8, 10 и 23, почвы 7, 17, 18 и 22 и почвы 19, 20 и 21), сливающихся через отдельные почвы в основную группу почв Лейк-Дистрикта, для которой почва 3 и в меньшей степени почва 5 не типичны. Способ, которым следует выбирать почвы для экспериментального исследования реакции растений

на содержание в почве питательных веществ, определяется целями этого исследования. Если нужно, чтобы группы почв были достаточно однородны, используют лишь те почвы, которые связаны на низком уровне пороговых расстояний (т. е. почвы 1, 8, 10, 23, 7, 17, 18, 22, 9, 11, 14, 6, 19, 20 и 21). Если стремятся охватить весь диапазон изменений свойств почвы, то берут лишь некоторые из почв, принадлежащих разным кластерам, почвы, более или менее от них отличающиеся, и, разумеется, почву 3.

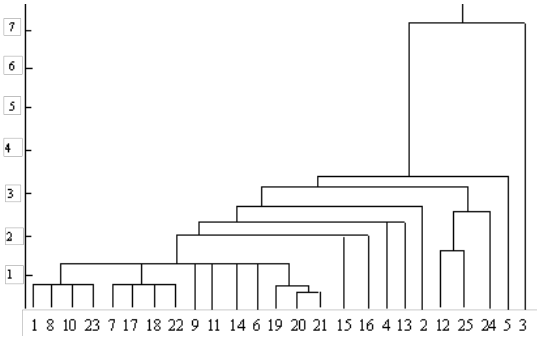


Рис. 19. **Дендрограмма кластерного анализа почв Лейк-Дистрикта**

Другим способом построения кластерной структуры является построение так называемого «дерева минимальной протяженности». Оно представляет собой ломаную линию, соединяющую все точки набором прямолинейных отрезков, между парами переменных. Соединение должно осуществляться по следующим правилам:

- на линии не возникает замкнутых петель;
- каждая точка лежит хотя бы на одной прямой;
- отрезки являются связанными;
- сумма длин отрезков минимальна.

На рисунке 20 показан простой пример дерева с целочисленными длинами отрезков и общей длиной в 22 единицы.

Для описания качественных признаков используется метод взаимного осреднения. В экологии данный метод используется для описания наличия-отсутствия каких-либо переменных (индикаторные виды). В зависимости от сочетания видов-индикаторов все изучаемые выборки разбиваются на группы. В пределах каждой выборки находят средние значения параметров. Эти значения соотносят со средними значениями установленных групп, и каждую выборку относят к той или иной группе. Например, при изучении распределения видов в зависимости от мощности органического слоя и кислотности почвы.

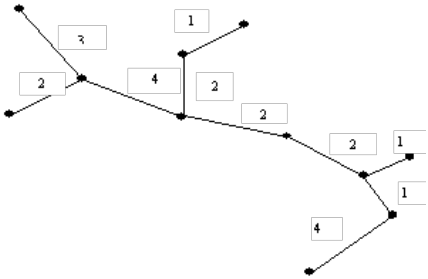


Рис. 20. «**Дерево минимальной протяженности**» **с целочисленными длинами отрезков**

Список литературы

1. *Джефферс, Дж.* Введение в системный анализ: применение в экологии / Дж. Джефферс; пер. с англ. Д. О. Логофета; под ред. и с предисл. Ю. М. Свирежева. – М.: Мир, 1981. – 256 с.

2. *Дулепов, В. И.* Системная экология: учебное пособие / В. И. Дулепов, О. А. Лескова, И. С. Майоров; под ред. Л. И. Александровой. – Владивосток, 2004. – 209 с.

3. *Петракова, Н. В.* Основы математического моделирования. Модели. Методы. Примеры / Н. В. Петракова. – Брянск: Изд-во Брян. ГСХА. 2011. – 162 с.

4. *Смиряев, А. В.* Моделирование: от биологии до экономики: учебное пособие для студентов специальности «Селекция и генетика сельскохозяйственных культур» / А. В. Смиряев, А. В. Исачкин, Л. К. Харрасова. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 122 с.

5. *Франс, Дж.* Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Торнли. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

6. *Leslie, P. H.* On the use of matrices in certain population mathematics. Biometrica. – 1945. – V. 33, № 3. – P. 183.

4.4. Оптимизационные модели

4.4.1. Понятие и преимущества оптимизационных моделей

Оптимизационные модели предполагают нахождение максимума или минимума какого-то математического выражения или функции, когда некоторые из переменных мы можем изменять в определенных пределах.

Оптимизация – целенаправленная деятельность, связанная с получением наилучших результатов при заданных условиях. Поиски оптимальных решений привели к созданию специальных математических методов, и уже в XVIII в. были заложены математические основы оптимизации (вариационное исчисление и др.). Однако до второй половины

XX в. практическое использование математических методов оптимизации ограничивалось большим объемом вычислительной работы, которую без компьютера реализовать было крайне трудно.

Постановка задач оптимизации предполагает существование конкурирующих свойств процесса, например, количество продукции – расход сырья, количество продукции – качество продукции. Выбор компромиссного варианта для указанных свойств и представляет собой процедуру решения оптимизационной задачи.

Примеры постановки оптимизационных задач в экологии, экономике и сельском хозяйстве:

• с помощью динамической модели роста дрожжей в смешанной культуре можно попытаться определить соотношение между исходными количествами обоих видов, при которых продуцируется максимум дрожжевых клеток;

• в модели роста овса и ячменя в совместном посеве можно определить, каково оптимальное исходное соотношение между этими культурами, дающее максимальный общий урожай;

• для реализации определенной массы сезонных товаров создается сеть временных торговых точек. Требуется выбрать разумным образом: число точек, их размещение, товарные запасы и количество персонала на каждой из них так, чтобы обеспечить максимальную экономическую эффективность распродажи;

• при организации медицинского обследования в районе, где обнаружены случаи опасного заболевания, требуется разработать такой план обследования (число медпунктов, их размещение, последовательность осмотров специалистами, виды анализов и т. д.), который позволит выявить, по возможности, максимальный процент заболевших и носителей инфекции. На это выделены ограниченные материальные средства, оборудование, медицинский персонал;

• оптимизация селекционно-генетических исследований: в распоряжении имеется коллекция образцов растений, несущих гены, ответственные за проявление различных ценных признаков: по одному, два, три и более генов (возможно, сцепленных) в одном образце. Требуется разработать оптимальную схему выбора части образцов и их скрещиваний, чередующихся с отборами по фенотипу, с целью вывести новый образец с заранее заданным новым сочетанием генов;

• оптимизация деятельности хозяйства: как лучше всего организовать деятельность крупного фермерского хозяйства – какие культуры и на каких площадях выращивать, в какой пропорции следует выделять средства для животноводства, растениеводства и т. д. – для получения максимальной прибыли.

При постановке оптимизационной задачи важно требовать экстремального значения лишь одной величины, т. е. одновременно системе

не должно приписываться два и более критерия оптимизации, так как практически всегда экстремум одного выражения не совпадает с экстремумом другого. Оптимизируемый вариант должен оцениваться какой-либо количественной мерой – критерием оптимальности. На основе выбранного критерия оптимальности составляется целевая функция, представляющая собой зависимость критерия оптимальности от параметров, влияющих на ее значение. В процессе решения задачи оптимизации находят экстремум целевой функции.

Применение оптимизационных моделей для решения подобных задач имеет следующие преимущества:

1. В ходе решения можно узнать значения переменных целевой функции, при которых она оптимальна.

2. Метод показывает то ограничение, которое нужно ослабить, чтобы улучшить оптимальное значение целевой функции. При условии, что это ограничение можно ослабить, экспериментатор сможет найти еще лучшее решение.

К основным элементам оптимизационных моделей относят: управляемые переменные, которые могут изменяться в определенных пределах и оптимальные значения которых должны быть определены; целевую функцию, которая показывает, что необходимо найти; ограничения целевой функции (это условия, ограничивающие возможность выбора значений управляемых переменных).

Методы оптимизации могут быть скалярными (оптимизация проводится по одному критерию), векторными (оптимизация проводится по многим критериям), поисковыми (включают методы регулярного и случайного поиска), аналитическими (методы дифференциального исчисления, методы вариационного исчисления и др.), вычислительными (основаны на математическом программировании, которое может быть линейным, нелинейным, дискретным, динамическим, стохастическим, эвристическим и др.), теоретико-вероятностными, теоретико-игровыми и др.

Когда неизвестных переменных только две, задачи оптимизации легко решаются графическим методом. Для более чем двух переменных задача сильно усложняется, и обычный подход к ее решению предполагает использование «симплекс-метода», практическое применение которого основано на проведении итерационных вычислений до тех пор, пока не будет получено оптимальное решение. Реализация расчетов возможна с помощью калькулятора (один из вариантов описан И. Г. Пугачевой и др. [8]) или при использовании специальных компьютерных программ (одна из простейших – *Simplex Advanced*).

4.4.2. Графический способ решения оптимизационных задач

В качестве примера рассмотрим решение двух задач, которые без преувеличения можно назвать классическими. Первая была предложена Дж. Частоном в 1971 г. и позволяет разработать оптимальную стратегию питания для хищника. Вторая помогает фермеру выбрать самый дешевый способ внесения удобрений при условии соблюдения агротехнических требований.

Задача 1. Пусть существует хищник, гнездо которого находится в точке *A*, и есть две потенциальные жертвы на участках *B* и *C*. Время, необходимое хищнику для того, чтобы добраться до пищи и возвратиться с единицей добычи, считается 2 и 3 мин соответственно. На поимку добычи на участке *B* хищник тратит 2 мин, а на участке *C* – 1 мин. Энергетическая ценность единицы добычи на участке *B* = 25 Дж, а на участке *C* = 30 Дж. Следует найти способ добычи пищи, который давал бы максимальный энергетический выход при следующих условиях:

- время на путь за добычей в обе стороны – не более 120 мин/сутки.
- время на поимку – не более 80 мин/сутки.

Обозначим переменные: x_1 – количество жертв на участке *B*, x_2 – количество жертв на участке *C*.

Введем ограничения (они записываются в виде неравенств):

- на время в пути: $2x_1 + 3x_2 \leq 120$;
- на время поимки жертвы: $2x_1 + 1x_2 \leq 80$.

Нужно записать и неявные ограничения: $x_1 \geq 0$ и $x_2 \geq 0$, так как хищник не может поймать отрицательное число жертв. При этих ограничениях мы хотим оптимизировать целевую функцию: максимум энергии $Z = 25x_1 + 30x_2$.

Решение. Ограничение по времени в пути показывает, что если $x_1 = 0$, то x_2 может быть не более 40 единиц. Аналогично, если $x_2 = 0$, то x_1 может быть не более 60.

Комбинации предельных значений x_1 и x_2 можно представить в виде прямой, соединяющей две точки ($x_1 = 60; x_2 = 0$) и ($x_1 = 0; x_2 = 40$). Применив аналогичное рассуждение к ограничению по времени поиска пищи, мы получим, что если $x_1 = 0$, то x_2 не может превышать 80 единиц, а если $x_2 = 0$, то x_1 не может превышать 40 единиц.

Таким образом, все имеющие смысл решения (рисунок 21) лежат в четырехугольнике *OPQR*, а максимум целевой функции – в точке, которая наиболее удалена от начала координат. В направлении, указанном стрелкой, эта точка имеет координаты ($x_1 = 30; x_2 = 20$), а максимальное значение функции равно $Z = 25x_1 + 30x_2 = 25 \times 30 + 30 \times 20 = 1350$ Дж.

Можно определить, как влияет ослабление одного или обоих ограничений на целевую функцию, имея в виду, что самым важным при оп-

тимизации является нахождение того ограничения, ослабление которого позволяет найти еще лучшее решение.

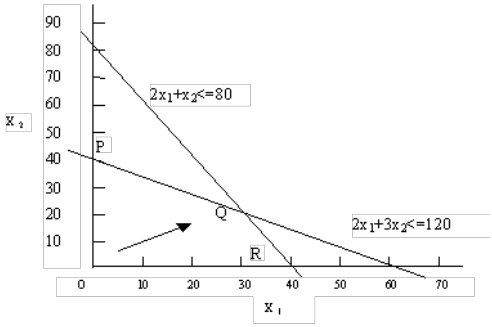


Рис. 21. **Графическое представление решения задачи 1**

Задача 2. Фермеру необходимо определить количество свиного навоза и сложных минеральных удобрений для разбрасывания на 20 га лугопастбищных угодий таким образом, чтобы стоимость внесенных удобрений была минимальной. При этом необходимо внести не менее 75 кг/га азота, 25 кг/га фосфора, 35 кг/га калия. Производительность труда при разбрасывании навоза составляет 8 т/час, при разбрасывании сложных удобрений – 0,4 т/час. Ресурс времени на выполнение данной операции – 25 часов. Стоимость 1 тонны навоза – 2,5 у.е., 1 тонны сложных удобрений – 130 у.е. (таблица 15).

Таблица 15

Химический состав удобрений, кг/т

Удобрение	Азот	Фосфор	Калий
Свиной навоз	6	1,5	4
Сложное удобрение	250	100	100

Обозначим переменные: x_1 – количество свиного навоза (т), x_2 – количество сложных удобрений (т).

Обозначим целевую функцию: минимум затрат $Z = 2{,}5x_1 + 130x_2$.

Введем ограничения:

• на нормы внесения удобрений:

$6x_1 + 250x_2 \geq 1500$ азот;

$1{,}5x_1 + 100x_2 \geq 500$ фосфор;

$4x_1 + 100x_2 \geq 700$ калий;

• на временной ресурс: $x_1/8 + x_2/0{,}4 \leq 25$, или, умножив обе части на 8, $x_1 + 20x_2 \leq 200$.

Решение. Найдем координаты точек пересечения графиков с осями координат.

Для ограничения по азоту:

$6x_1 + 250x_2 = 1500$

$x_1 = 0; x_2 = 6$

$x_2 = 0; x_1 = 250$

Для ограничения по фосфору:

$1{,}5x_1 + 100x_2 = 500$

$x_1 = 0; x_2 = 5$

$x_2 = 0; x_1 = 333$

Для ограничения по калию:

$4x_1 + 100x_2 = 700$

$x_1 = 0; x_2 = 7$

$x_2 = 0; x_1 = 175$

Для ограничения по времени внесения удобрений:

$x_1 + 20x_2 = 200$

$x_1 = 0; x_2 = 10$

$x_2 = 0; x_1 = 200$

Графический способ решения задачи предполагает построение линий по рассчитанным координатам точек; это точки пересечения с осями координат (рисунок 22).

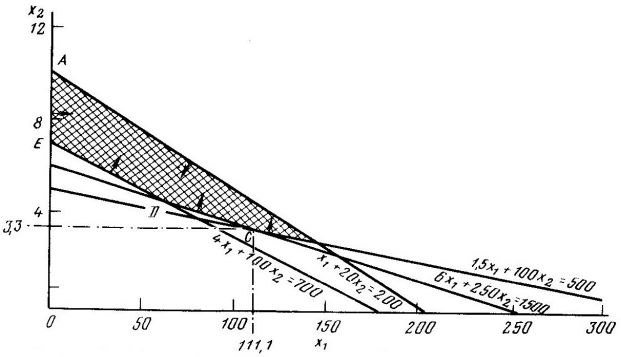


Рис. 22. **Графическое представление решения задачи 2**

При нанесении линий на рисунке 22 важно уяснить, где располагается область допустимых решений. В данном случае возможные решения располагаются выше прямых, отображающих ограничения по азоту, фосфору, калию, так как необходимо внести не менее указанного количества этих элементов питания. Ограничение по времени, наоборот,

указывает на то, что допустимые решения находятся ниже соответствующей прямой. Следовательно, область, удовлетворяющая всем условиям, находится в границах многоугольника *ABCDE*.

Далее следует найти оптимальное решение: так как нас интересует минимальная стоимость внесения удобрений, то оптимальное решение соответствует координатам точки, принадлежащей многоугольнику *ABCDE* и наиболее близкой к началу координат. На рисунке 22 это точка *C* с координатами $x_1 = 111{,}1$; $x_2 = 3{,}3$. Подставив эти значения в уравнение целевой функции, находим минимальную стоимость внесения удобрений: $Z = 2{,}5 \times 111{,}1 + 130 \times 3{,}33 = 277{,}75 + 432{,}9 \approx 711{,}1$.

4.4.3. Динамическое программирование

Существует много задач, когда оптимальный план составляется на сравнительно короткий срок и более или менее известны необходимые условия его выполнения.

При перспективном планировании план составляется на длительный период, в течение которого возможны существенные изменения как в условиях производства, так и в соответствующих ресурсах. Чтобы учесть динамику процессов, этот период нужно разбить на ряд этапов, в результате чего в модели появляются специфические ограничения, а число уравнений и неравенств значительно увеличивается. Подобные задачи решаются методом динамического программирования. Это более молодая отрасль оптимального планирования, чем, например, линейное программирование. Динамическое программирование специально предназначено для оптимизации многошаговых процессов.

Рассмотрим пример. Пусть некоторому хозяйству на пять лет выделен кредит в размере *Q* для развития двух отраслей: растениеводства и животноводства. В начале каждого года часть этих средств распределяется между указанными отраслями. Известна отдача, получаемая от вложения средств в каждую отрасль. При этом отдача отраслей может меняться по годам и зависеть от предыдущих вложений. Вопрос заключается в том, чтобы для каждого года определить размер средств, которые следует направить на развитие каждой отрасли, причем общая прибыль хозяйства, полученная от обеих отраслей за пять лет, должна быть максимальной.

Сформулированная задача о распределении средств между растениеводством и животноводством оказывается задачей на поиск максимума целевой функции, которая имеет вид

$$\sum_{i=1}^{5} [f'_{i+1}(x_i) + f''_{i+1}(Q_i - x_i)] .$$

Здесь $f'_{i+1}(x_i)$ – прибыль первой отрасли (растениеводства) в $(i + 1)$-м году при условии, что в предыдущем году в нее вложили

x_i средств. Аналогичный смысл имеет слагаемое $f''_{i+1}(Q_i - x_i)$ для второй отрасли (животноводства). Здесь учтено, что если в первую отрасль вложили x_i средств, то для второй их осталось $Q_i - x_i$, причем

$$\sum_{i=1}^{5} Q_i = Q.$$

В реальном случае дело может касаться распределения средств не между двумя отраслями, а среди большего количества. Например, растениеводство можно разбить на «подотрасли»: зерновое хозяйство, овощеводство, кормопроизводство и т. д., животноводство – на молочное, откорм крупного рогатого скота, свиноводство, овцеводство и т. д. В число отраслей, которым выделяются деньги, можно также включить механизацию, мелиорацию, строительство.

Специфика и трудность задач, для решения которых целесообразно прибегать к методам динамического программирования, состоит в том, что оптимум нужно найти в целом для всей последовательности этапов (лет). Сравнительно легко сделать выбор для одного шага, сложнее предусмотреть, как он отразится в долгосрочной перспективе. Соображения ближайшей выгоды порой оборачиваются крупными просчетами. Скажем, мы знаем, что наибольшую прибыль от вложения средств дает животноводство, поэтому можно главную их часть направить именно в эту отрасль. Но подобное решение может оказаться неправильным, если на дело взглянуть с точки зрения перспективы. Лишая средств растениеводство, мы тем самым подрываем развитие не только данной отрасли, но и затрудняем развитие животноводства, поскольку заведомо ослабляем его кормовую базу, возможно, уже в следующем году. Предвидеть последствия своих действий – значит предвидеть будущее. Динамическое программирование как раз и позволяет учитывать те выгоды, которые можно получить не на одном каком-либо этапе, а от всего процесса с учетом перспективы.

Итак, общее правило планирования многоэтапного процесса состоит в том, что решение на каждом шаге должно приниматься с учетом будущих последствий. Но в реальности планирование часто ведется на один шаг вперед. Дело в том, что предусмотреть, как события станут развиваться в будущем, очень трудно – нужно перебрать огромное число вариантов.

Идея решения задач динамического программирования основана на том, что среди шагов, на которых приходится принимать решение, есть один – последний, когда не требуется многовариантных расчетов. Нужно только учесть выгоду, которую можно получить именно на этом этапе. Если бы нам каким-либо образом удалось оптимально распределить средства между отраслями для первых четырех лет, то спланировать их размещение для пятого года не составляло бы труда. Мы должны были

бы разделить остатки средств между двумя отраслями так, чтобы прибыль, полученная в последнем году, была максимальной.

Идея динамического программирования и состоит в том, что процесс планирования начинается с последнего шага (года). Рассматриваются все возможные ситуации (остаток средств), возможные в результате выполнения предпоследнего шага, и для каждой ситуации выбирается «условно» наилучший вариант последнего шага. Оптимально спланировав последний шаг, отступаем к предыдущему и оцениваем его с тех же позиций. Таким образом, процесс динамического программирования разворачивается в обратном порядке – от последнего шага к первому, от конца планового периода к его началу. Выигрыш здесь достигается за счет того, что вместо решения сложной глобальной проблемы раз за разом решаются несравнимо более простые задачи последовательной «условной» оптимизации одного шага.

Обратим внимание еще на одну особенность, отличающую его от линейного программирования. Оба метода получили свое название не случайно. Напомним, что сфера использования линейного программирования предполагает линейность целевой функции и ограничений. Во многих случаях такое допущение вполне приемлемо, но далеко не всегда. Так, двойная доза удобрения может не только не дать двойной прибавки урожая, но и нанести вред растениям и почве; увеличение в два раза средств на развитие производства зачастую не способно привести к двойному увеличению прибыли и т. д. Когда предположение о пропорциональности результата исходным действиям явно несправедливо, обращаться к линейному программированию неправомерно. Что же касается динамического программирования, то оно применимо и для решения многих «нелинейных» задач.

Рассмотрим простой игровой пример по оптимизации пути. Предположим, что нам нужно соорудить путь, соединяющий два пункта – *A* и *B*, из которых второй лежит к северо-востоку от первого. Для простоты допустим, что прокладка пути состоит из ряда шагов, и на каждом шаге мы можем двигаться либо строго на восток, либо строго на север; любой путь из *A* в *B* представляет собой ступенчатую ломаную линию, отрезки которой параллельны одной из координатных осей (рисунок 23).

Затраты на сооружение каждого из таких отрезков заранее известны (они разные). Требуется проложить такой путь из отрезка *A* в *B*, при котором суммарные затраты минимальны.

Как это сделать? Можно поступить одним из двух способов: либо перебрать все возможные варианты пути и выбрать тот, на котором затраты минимальны (даже при небольшом числе отрезков это очень трудно – слишком много вариантов); либо разделить процесс перехода из *A* в *B* на отдельные шаги (один шаг – один отрезок) и оптимизировать

управление по шагам, начиная с последнего. Оказывается, что второй способ гораздо удобнее. Здесь, как и везде в исследовании операций, сказываются преимущества целенаправленного, организованного поиска решения перед «слепым» перебором.

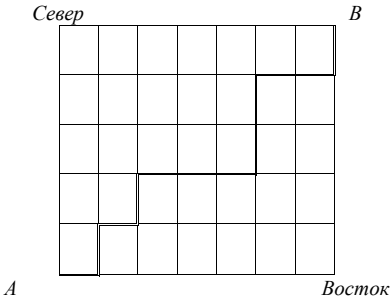


Рис. 23. **Схема построения пути**

Пусть любой путь из A в B состоит из $m = 7 + 5 = 12$ отрезков, направленных только на восток или на север. Проставим на каждом из отрезков известное число, выражающее стоимость прокладки пути по этому отрезку (рисунок 24). Требуется выбрать такой путь из A в B, для которого сумма чисел (затрат), стоящих на всех отрезках пути, минимальна.

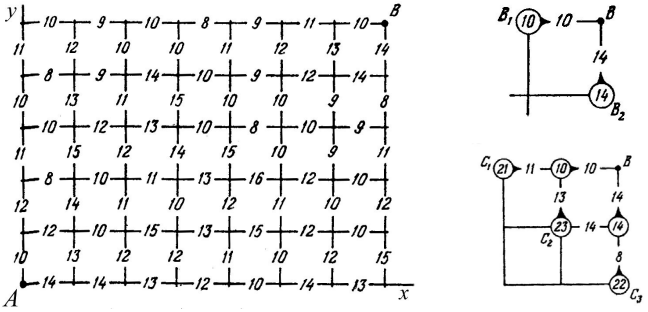


Рис. 24. **Условная стоимость отрезков пути**

Процедуру оптимизации будем разворачивать в обратном направлении – от конца к началу. Прежде всего произведем оптимизацию последнего 12-го шага. Рассмотрим отдельно правый верхний угол нашей прямоугольной сетки.

Где мы можем находиться после 11-го шага? Только там, откуда за 1 (последний) шаг можно попасть в B, т. е. в одной из точек B_1 или

B_2. Если мы находимся в точке B_1, у нас нет выбора (управление вынужденное): надо идти на восток, и это обойдется нам в 10 единиц (условные оптимальные затраты последнего шага). Запишем число 10 в кружочке у точки B_1, а оптимальное управление покажем короткой стрелкой, исходящей из B_1 и направленной на восток. Для точки B_2 управление тоже вынужденное (север), расход (условные оптимальные затраты) до конца равен 14. Запишем его в кружочке у точки B_2 со стрелкой. Таким образом, условная оптимизация последнего шага сделана, и условные оптимальные затраты для каждой из двух возможных точек B_1 и B_2 найдены и записаны в соответствующем кружочке (см. рисунок 24).

Теперь оптимизируем 11-й шаг. После 10-го шага мы могли оказаться в одной из точек C_1, C_2, C_3 (см. рисунок 24). Найдем для каждой из них условное оптимальное управление и условные оптимальные затраты. Для точки C_1 управление вынужденное: идти на восток; обойдется это нам до конца пути в 21 единицу (11 на данном шаге, плюс 10, записанных в кружочке при B_1). Число 21 записываем в кружочке C_1. Для точки C_2 управление уже не вынужденное: мы можем идти как на восток, так и на север. В первом случае мы затратим на данном шаге 14 единиц и от B_2 до конца – еще 14, всего 28 единиц. Если пойдем на север, то затратим 13+10, всего 23 единицы. Значит, если мы в точке C_2, то условное оптимальное управление – идти на север (отмечаем это направление стрелкой, а число 23 – условные оптимальные затраты – записываем в кружочке у C_2). Для точки C_3 управление снова вынужденное («*с*»); обойдется оно до конца пути в 22 единицы (ставим стрелку на север, число 22 записываем в кружочке у C_3).

Аналогично «пятясь» от предпоследнего шага назад, найдем для каждой точки (всего их 7×5=35 с двумя возможными направлениями в каждой точке) условное оптимальное управление («*с*» или «*в*»), которое обозначим стрелкой, и условный оптимальный расход до конца пути, который запишем в кружочке. Вычисляется он так: расход на данном шаге складывается с уже оптимизированным будущим расходом, записанным в кружочке, куда ведет стрелка. Таким образом, на каждом шаге мы оптимизируем только один шаг, а следующие за ним – уже оптимизированы. Конечный результат процедуры оптимизации показан на рисунке 25.

Таким образом, условная оптимизация уже выполнена: в какой бы из узловых точек мы ни находились, мы уже знаем, куда идти (стрелка) и во что нам по-минимуму обойдется путь до конца (число в кружочке). В том числе, если мы находимся в точке A: в кружочке при точке A записан оптимальный расход (цена) на сооружение всего пути из A в B: $W^* = 118$.

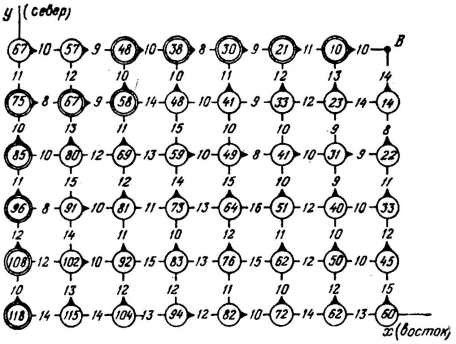


Рис. 25. **Оптимальный способ построения пути**

Теперь остается прочитать безусловное оптимальное управление – траекторию, ведущую из A в B самым дешевым способом. Для этого нужно только «идти по стрелкам». Такая оптимальная траектория отмечена на рисунке 25 дважды обведенными кружочками. Соответствующее безусловное оптимальное управление будет:

$$x^* = (c, c, c, c, в, в, c, в, в, в, в, в),$$

т. е. первые четыре шага мы должны сделать на север, следующие два – на восток, затем опять один – на север и остальные пять – на восток. Задача решена.

Заметим, что в ходе условной оптимизации мы можем столкнуться со случаем, когда оба управления для какой-то точки на плоскости являются оптимальными, т. е. приводят к одинаковому расходу средств от этой точки до конца. Например, в точке с координатами (5; 1) оба управления «*c*» и «*в*» являются оптимальными, т. е. дают минимальный расход до конца, равный 62. Из них мы произвольно выбираем любое (в нашем случае мы выбрали «*c*»). Такие случаи неоднозначного выбора оптимального управления постоянно встречаются в динамическом программировании. От выбора одного из них, разумеется, может зависеть оптимальное управление всем процессом, но не оптимальный расход средств.

А теперь вернемся к началу и попробуем решить задачу «наивным» способом, выбирая на каждом шаге, начиная с первого, самое выгодное (для этого шага) направление (если таких два – выбираем любое). Таким способом мы получим управление:

$$x = (c, c, в, в, в, в, c, в, в, в, c, c).$$

Подсчитаем расходы для этой траектории: $W = 10 + 12 + 8 + 10 + 11 + 13 + 15 + 8 + 10 + 9 + 8 + 14 = 128$, что, безусловно, больше, чем $W^* = 118$. Причина в том, что, «шагнув» в очередной раз по самому де-

шевому отрезку, мы можем попасть в точку, откуда любой следующий шаг и весь оставшийся путь весьма дорогие. В данном случае разница не очень велика, но в других она может быть существенной.

4.4.4. Выбор курса лечения

Рассмотрим модель, предложенную Р. Ледли и Л. Лестедом [4]. Имеются две возможности лечения рака – лучевая терапия и химиотерапия, причем эффективность обоих методов выражена экспертом в некоторых общих единицах. Например, лекарственный препарат обладает эффективностью в 1000 единиц на грамм препарата, а облучение – 1000 единиц в минуту. Допустим, что для выздоровления больному требуется не менее 3000 единиц эффективности. Однако оба метода токсичны. Поэтому ни тот, ни другой нельзя применять неограниченно. Пусть токсичность методов также выражена в общих единицах, например, токсичность лекарства равна 400 единицам на грамм, а токсичность облучения – 1000 единицам в минуту. Допустим, что конкретный больной не должен получить более 2000 таких единиц.

Наконец, известно, что введение одного грамма лекарственного препарата причиняет больному в три раза больше неудобств, чем облучение в течение одной минуты, и, следовательно, если мы ввели x_1 единиц веса лекарств и облучали больного в течение x_2 минут, то причинили ему общее неудобство, равное

$$Z = 3x_1 + x_2.$$

Задача состоит в том, чтобы подобрать такое соотношение обоих методов лечения (x_1 и x_2), которое удовлетворяло бы сформулированным выше ограничениям и в то же время причиняло как можно меньше неудобств больному. Такое соотношение назовем оптимальным.

Переходя на математический язык, мы можем сформулировать задачу следующим образом: в плоскости x_1Ox_2 нужно найти такую точку (x_1; x_2), чтобы величина $Z = 3x_1 + x_2$ была наименьшей и при этом выполнялись условия:

$$1000\,x_1 + 1000\,x_2 \geq 3000$$

(ограничение на эффективность) и

$$400\,x_1 + 1000\,x_2 \leq 2000$$

(ограничение на токсичность).

К этим ограничениям следует добавить еще:

$$x_1 \geq 0 \text{ и } x_2 \geq 0,$$

следующие из того, что x_1 и x_2 по условию задачи не могут принимать отрицательные значения.

Условия задачи выделяют в плоскости x_1Ox_2 некоторую область, в которой и находится искомая оптимальная точка. Найдем форму этой области. Прежде всего, из последних ограничений следует, что ис-

комая точка лежит в первом квадранте. Далее из первого ограничения ($1000\,x_1+1000\,x_2 \geq 3000$) следует, что эта точка находится либо на самой прямой $x_1 + x_2 = 3$, либо выше этой прямой. Аналогично из второго ограничения ($400\,x_1+1000\,x_2 \leq 2000$) следует, что точка может находиться либо на прямой $2\,x_1 + 5\,x_2 = 10$, либо ниже этой прямой. Сопоставляя эти условия, получаем, что искомая точка может находиться либо внутри треугольника *ABC* (рисунок 26), либо на его границе.

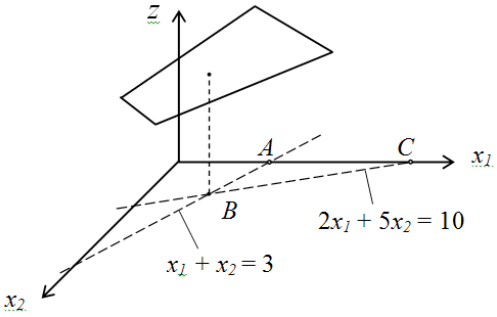


Рис. 26. **Графическое решение задачи**

Итак, из всех возможных точек (x_1, x_2) треугольника *ABC* (вместе с его границей) нам нужно найти такую, чтобы величина $z = 3\,x_1 + x_2$ была наименьшей.

Уравнение $Z = 3\,x_1 + x_2$ – это уравнение плоскости в пространстве x_1, x_2, z.

Точка (x_1, x_2) пробегает все возможные положения в треугольнике *ABC*. В теории линейного программирования доказано, что z принимает наименьшее значение на границе треугольника, точнее, в одной (или нескольких) вершине этого треугольника. Если бы переменных (x_i) и ограничений было не 2–3, а больше, то оптимальное решение следовало искать среди вершин многомерной фигуры, а не треугольника.

Таким образом, достаточно найти координаты (x_1, x_2) вершин *A, B*, и *C*, подсчитать в этих вершинах значение величины $z = 3x_1 + x_2$, а затем выбрать наименьшее (или равные наименьшие) из этих значений. Координаты точек *A* и *C* находятся сразу: $A = (3, 0)$ и $C = (5, 0)$. Найдем координаты точки *B*. Эта точка лежит на пересечении двух прямых. Следовательно, ее координаты должны удовлетворять одновременно обоим уравнениям:

$$\begin{cases} x_1 + x_2 = 3 \\ 2x_1 + 5x_2 = 10 \end{cases}.$$

Эта система двух линейных уравнений относительно x_1 и x_2 решается, если, например, первое уравнение умножить на два, а затем вычесть его из второго. Мы получим: $x_1 = 5/3$, $x_2 = 4/3$. Это и есть координаты точки B.

Подсчитаем теперь z в точках A, B, и C. Имеем:

$$z_A = 9;\ z_B = 3 \cdot 5/3 + 1 \cdot 4/3 = 19/3 \approx 6{,}3;\ z_C = 15.$$

Наименьшее значение z (минимум неудобств больному) принимает в точке $B = (5/3, 4/3)$. Следовательно, координаты этой точки и являются искомым решением. Курс лечения будет оптимальным, если ввести 5/3 грамм лекарственного препарата и провести облучение в течение 4/3 минуты.

Разумеется, в приведенном примере ситуация намеренно упрощена. В реальном случае, например, может быть не один, а несколько лекарственных препаратов. В соответствии с этим может возрасти и число всевозможных ограничений. Итак, если функция z, наибольшее (или наименьшее) значение которой требуется отыскать, как и в этом примере, линейна по x_i ($z = a_1x_1 + a_2x_2 + \ldots + a_nx_n$) и ограничения тоже записываются с помощью любых линейных равенств или неравенств, то подобные задачи являются задачами линейного программирования.

4.4.5. Многокритериальные задачи

Рассмотренные ранее ситуации имели очень важное общее свойство – в каждой из них была единственная целевая функция. Именно единственность этой функции обеспечила возможность создания эффективных методов решения оптимизационных задач. Однако возникает вопрос: а хорошо ли такие оптимизационные модели описывают реальную действительность? Ответ на него неоднозначен.

Да, эти модели могут достаточно хорошо описывать сравнительно простые ситуации, скажем, такие, как обсуждались выше. Нет, если приходится иметь дело с таким очень часто встречающимся фактом, когда целенаправленная человеческая деятельность преследует сразу несколько целей. В качестве примера вспомним очень популярный в одно время лозунг: «Дадим больше товаров лучшего качества по более низкой цене». Он в точности характеризует три противоречивые цели, и с этим приходится считаться.

Другой пример – многокритериальный отбор при сравнении линий в сортоиспытании, когда желательно, чтобы отобранные линии имели одновременно наибольшую урожайность, процент белка в зерне, самую низкую полегаемость и т. д.

Типичный пример – организация работы промышленного предприятия. С одной стороны, нам хотелось бы обратить в максимум валовый объем продукции V. Желательно также было бы получить максималь-

ный чистый доход D. Что касается себестоимости S, то ее хотелось бы обратить в минимум, а производительность труда $П$ – в максимум. При обдумывании задачи может возникнуть еще ряд дополнительных критериев.

Такая множественность показателей эффективности, из которых один желательно обратить в максимум, а другие – в минимум, характерна для любой сколько-нибудь сложной задачи исследования операций. Можно попытаться сформулировать ряд критериев, по которым будет оцениваться фермерское хозяйство, подумать о том, какой из них является главным (теснее всего связанным с целевой направленностью операции), а остальные (дополнительные) расположить в порядке убывающей важности. На этом примере можно убедиться в том, что а) ни один из показателей не может быть выбран в качестве единственного и б) формулировка системы показателей – не такая уж простая задача. И сами показатели, и их упорядоченность по важности зависят от того, с точки зрения чьих интересов оптимизируется решение.

Итак, типичной для крупномасштабной задачи исследования операций является многокритериальность – наличие ряда количественных показателей W_1, W_2,…, одни из которых желательно обратить в максимум, а другие – в минимум. Спрашивается: можно ли найти решение, одновременно удовлетворяющее всем этим требованиям? Нет. Решение, обращающее в максимум какой-то один показатель, как правило, не обращает ни в максимум, ни в минимум другие. Поэтому часто применяемая формулировка «достигнуть максимального эффекта при минимальных затратах» представляет собой не более чем фразу и при научном анализе должна быть отброшена.

Некоторые исследователи пытаются свести многокритериальную задачу к однокритериальной: составляют какую-то функцию от всех показателей W_i и рассматривают ее как один, «обобщенный» показатель, по которому и оптимизируется решение. Часто такой обобщенный показатель имеет вид дроби, в числителе которой стоят все величины, увеличение которых желательно, а в знаменателе – те, увеличение которых нежелательно. Например, продуктивность и доход – в числителе, время выполнения работы и расходы – в знаменателе и т. д.

Такой способ объединения нескольких показателей в один не может быть однозначно рекомендован, так как он основан на по крайней мере одном допущении, что недостаток в одном показателе всегда может быть скомпенсирован за счет другого, например, меньшая продуктивность – за счет более низкой стоимости и т. д. Часто это несправедливо.

Вспомним «критерий для оценки человека», предложенный когда-то Л. Н. Толстым. Он имеет вид дроби, в числителе которой стоят действительные достоинства человека, а в знаменателе – его мнение о себе.

С первого взгляда такой подход может оказаться логичным. Но представим себе человека, почти совсем не имеющего достоинств, но совсем не обладающего самомнением. По критерию Л. Н. Толстого, такой человек должен иметь бесконечно большую ценность, с чем уж никак нельзя согласиться.

К подобным парадоксальным выводам может привести (и нередко приводит) пользование показателем в виде дроби, где в числителе стоят все величины, увеличение которых желательно, а в знаменателе – те, увеличение которых нежелательно.

Нередко применяется и другой сходный способ составления «обобщенного показателя эффективности» – он представляет собой «взвешенную сумму» частных показателей, в которую каждый из них (W_i) входит с каким-то «весом» a_i, отражающим его важность:

$$W=a_1W_1+a_2W_2+\dots .$$

Для тех показателей, которые желательно увеличить, веса a_i берутся положительными, уменьшить – отрицательными.

При произвольном назначении весов a_1, a_2… этот способ ничем не лучше предыдущего (разве что обобщенный критерий не обращается в бесконечность). Его сторонники ссылаются на то, что и человек, принимая компромиссное решение, тоже мысленно «взвешивает» все «за» и «против», приписывая больший вес более важным для него факторам. Это, может быть, и так, но, по-видимому, «весовые коэффициенты», с которыми входят в расчет разные показатели, не постоянны, а меняются в зависимости от ситуации.

Рассмотрим это на примере. Человек выходит из дому, чтобы ехать на работу, боится опоздать и размышляет: каким транспортом воспользоваться? Трамвай ходит часто, но идет долго; автобус – быстрее, но с большими интервалами. Можно, конечно, взять такси, но это обойдется дорого. Есть еще такое решение: часть пути проехать на метро, а затем взять такси. Но на стоянке может и не быть машин, добираясь же до работы со станции метро пешком, он рискует опоздать больше, чем если бы ехал на автобусе. Как ему поступить?

Перед нами типичная задача исследования операций с двумя критериями (показателями). Первый – среднее ожидаемое время опоздания T, которое хотелось бы минимизировать. Второй – ожидаемая стоимость проезда S; ее тоже желательно сделать минимальной. Но эти два требования, как мы поняли, несовместимы, поэтому человек должен принять компромиссное, приемлемое по обоим критериям, решение. Обобщенный показатель в данном случае будет выглядеть так:

$$W = a_1T + a_2S \rightarrow min.$$

Но беда в том, что весовые коэффициенты a_1 и a_2 нельзя считать постоянными. Они зависят как от самих величин T и S, так и от обстанов-

ки. Например, если человек недавно уже получил выговор за опоздание, коэффициент при T у него, вероятно, увеличится, а на другой день после получки, вероятно, уменьшится коэффициент при S. Если же назначать веса a_1 и a_2 произвольно, то, по существу, столь же произвольным будет и вытекающее из них «оптимальное» решение.

Нельзя надеяться полностью избавиться от субъективности в задачах, связанных с выбором решений. Даже в простейших, однокритериальных задачах она неизбежно присутствует, проявляясь хотя бы в выборе показателя эффективности и математической модели явления. Тем более, неизбежна субъективность при выборе решения в многокритериальной задаче. Правда, бывают редкие случаи, когда достаточно ознакомиться со значениями всех показателей для каждого варианта, чтобы сразу стало ясно, какой из них выбрать. Представим себе, например, что какой-то вариант решения x имеет преимущество над другими по всем показателям; ясно, что именно его следует предпочесть. Но гораздо чаще встречаются случаи, когда с первого взгляда ситуация неясна: один из показателей тянет в одну сторону, другой – в другую.

Несмотря на это математический аппарат может помочь при решении многокритериальных задач. Прежде всего, он позволяет решать «прямые» задачи исследования операций, т. е. для любого решения x находить значения показателей эффективности $W_1, W_2, \ldots, W_k$. Для простоты предположим, что все эти величины желательно максимизировать. Пусть в составе множества возможных решений есть два решения x_1 и x_2 такие, что все критерии $W_1, W_2, \ldots, W_k$ для первого решения больше или равны соответствующим критериям для второго решения, причем хотя бы один из них действительно больше. Очевидно, тогда в составе множества решений X нет смысла сохранять решение x_2, оно вытесняется решением x_1. Выбросим решение x_2 как неконкурентоспособное и перейдем к сравнению других пар по всем критериям. В результате такой процедуры отбрасывания заведомо непригодных, невыгодных (по сравнению хотя бы с одним из остальных) решений множество осмысленных решений обычно сильно уменьшается.

Что касается окончательного выбора, то он всегда остается прерогативой человека. Только человек с его непревзойденным умением решать неформальные задачи, принимать так называемые «компромиссные решения» (не строго-оптимальные, но приемлемые по ряду критериев) может взять на себя ответственность за окончательный выбор.

Существует еще один часто применяемый способ свести многокритериальную задачу к однокритериальной – это выделить один (главный) показатель W_1 и стремиться его обратить в максимум, а на все остальные W_2, W_3,… наложить только некоторые ограничения, потребовав, чтобы они были не меньше каких-то заданных w_2, w_3,… . Например, при оптимизации плана работы предприятия можно потребовать, чтобы

прибыль была максимальна, план по ассортименту – выполнен или немного перевыполнен, а себестоимость продукции – не выше заданной. При таком подходе все показатели, кроме главного, переводятся в разряд заданных условий α. Известный произвол в назначении границ w_2, w_3, …, разумеется, при этом остается; поправки в эти границы тоже могут быть введены в «диалоговом режиме».

Еще один путь построения компромиссного решения можно назвать «методом последовательных уступок». Предположим, что показатели W_1, W_2 ... удалось расположить в порядке убывающей важности. Сначала ищется решение, обращающее в максимум первый (важнейший) показатель $W_1 = W_1^*$. Затем назначается, исходя из практических соображений, возможно, с учетом малой точности, с которой нам известны входные данные, некоторая «уступка» ΔW_1, которую мы согласны сделать для того, чтобы максимизировать второй показатель W_2. Наложим на показатель W_1 ограничение: потребуем, чтобы он был не меньше, чем $W_1^* - \Delta W_1$, и при этом ограничении ищем решение, обращающее в максимум W_2. Далее снова назначим «уступку» в W_2, ценой которой можно максимизировать W_3, и т. д. Такой способ построения компромиссного решения хорош тем, что здесь сразу видно, ценой какой «уступки» в одном показателе приобретается выигрыш в другом и какова величина этого выигрыша.

4.4.6. Теоретико-игровые модели

Существует специальный раздел математики, который позволяет предсказывать неопределенные объективные (природа) и субъективные (сознательные действия противников, соперников или других лиц) действия. Он носит название «теория игр». Для биологов и специалистов по сельскому хозяйству важны разделы этой теории, в которых предполагается, что человек ведет «игру» с природой. Например, если фермер имеет средства лишь на один-два года, то ему нужны рекомендации для получения гарантированного урожая в текущем году, а не в среднем за много лет. Тогда вынужденная осторожность превращает любую случайность во врага. Погода из «нормального» стохастического фактора превращается в такого врага.

Общая схема подобных задач такова. Лицо, принимающее решение, имеет возможность сделать выбор из n возможных действий (например, выбрать сорта для посева, агроприемы и т. д.). Определена полезность каждого действия в зависимости от некоторых условий, о которых известно, что одно из них наверняка выполняется (засуха, холод, комфортные условия выращивания и т. д.). А вот какое – неизвестно. В дальнейшем эти условия мы будем называть состояниями природы. Иногда представляется возможным провести какой-либо эксперимент, который

с некоторой вероятностью дает информацию о том, в каком состоянии находится или будет находиться природа (например, попытаться получить прогноз). Проведение такого эксперимента может, вообще говоря, вести к дополнительным затратам. В этих условиях следует решить, какое действие лучше всего предпринимать.

Наиболее простыми из ситуаций, содержащих «плохую» неопределенность, являются так называемые конфликтные ситуации, в которых сталкиваются интересы двух (или более) сторон, преследующих разные (иногда противоположные) цели, причем выигрыш каждой стороны зависит от того, как себя поведут другие.

Примеры конфликтных ситуаций многообразны. К ним, безусловно, принадлежит любая ситуация, складывающаяся в ходе боевых действий, ряд ситуаций в области экономики. Столкновение противоречащих друг другу интересов наблюдается также в судопроизводстве, в спорте, видовой борьбе. В какой-то мере противоречивыми являются также взаимоотношения различных ступеней иерархии в сложных системах. В некотором смысле «конфликтной» можно считать и ситуацию с несколькими критериями: каждый из них предъявляет к управлению свои требования, и, как правило, эти требования противоречивы.

Если условия операции неизвестны, мы не можем успешно оптимизировать решение, как мы это сделали бы, если бы располагали большей информацией. Поэтому любое решение, принятое в условиях неопределенности, хуже решения, принятого при заранее известных условиях. Однако решение, плохое или хорошее, должно быть принято. Важно придать этому решению как можно больше разумности. Недаром Т. Л. Саати, один из зарубежных специалистов по исследованию операций, определяя свой предмет, говорил, что исследование операций представляет собой искусство давать плохие ответы на практические вопросы, на которые даются еще худшие ответы другими методами.

В теории игр разработана математическая теория конфликтных ситуаций. Ее цель – предложение рекомендаций по оптимальному поведению участников конфликта.

Каждая непосредственно взятая из практики конфликтная ситуация очень сложна, и ее анализ затруднен наличием несущественных факторов. Чтобы сделать возможным математический анализ конфликта, строится его математическая модель. Такую модель называют игрой. Игра ведется по определенным правилам. Эти правила указывают «права и обязанности» участников, а также исход игры – выигрыш или проигрыш каждого участника в зависимости от сложившейся обстановки.

Человечество издавна пользуется такими формализованными моделями конфликтов – «играми» в буквальном смысле слова (шашки, шахматы, карточные игры и т. п.). Отсюда и название «теории игр», и ее

терминология: конфликтные стороны условно называются «игроками», одно осуществление игры – «партией», исход игры – «выигрышем» или «проигрышем». Будем считать, что выигрыши (проигрыши) участников имеют количественное выражение (если это не так, то всегда можно им его приписать, например, в шахматах считать «выигрыш» за единицу, «проигрыш» – за минус единицу, «ничью» – за нуль).

Развитие игры во времени можно представлять как ряд последовательных «ходов» участников (в простейшем варианте – один ход). Ходом называется выбор игроком одного из предусмотренных правилами игры действий и его осуществление. Ходы бывают личные и случайные. При личном ходе игрок сознательно выбирает и осуществляет тот или другой вариант действий (пример – любой ход в шахматах). При случайном ходе выбор осуществляется не только волей игрока, но также каким-то механизмом случайного выбора («бросание монеты» с оптимально подобранной вероятностью и т. д.).

Можно предположить, что все эти решения приняты игроком заранее. Это будет значить, что игрок выбрал определенную стратегию. Стратегия бывает чистой и смешанной. Чистая стратегия состоит только из личных ходов, смешанная включает случайные ходы. Выбор стратегии означает, что игрок может и не участвовать в игре лично, а передать алгоритм выбора своих ходов незаинтересованному лицу. Стратегия, например, может быть задана машине-автомату в виде программы (именно так играют в шахматы компьютерные программы).

Игра называется игрой с нулевой суммой, если сумма выигрышей всех игроков равна нулю (т. е. каждый игрок выигрывает только за счет других). Самый простой случай – парная игра с нулевой суммой – называется антагонистической игрой (или игрой со строгим соперничеством). Теория антагонистических игр – наиболее развитый раздел теории игр с четкими рекомендациями. Ниже познакомимся с некоторыми ее понятиями и приемами.

Теория игр, как и всякая математическая модель, имеет свои ограничения. Одно из них – предположение о полной («идеальной») разумности противника. В реальном конфликте зачастую оптимальная стратегия состоит в том, чтобы угадать, в чем противник «глуп», и воспользоваться этой глупостью в свою пользу. Схемы теории игр не включают элементов риска, неизбежно сопровождающего разумные решения в реальных конфликтах. В теории игр чаще выявляется наиболее осторожное, «перестраховочное» поведение участников конфликта. Сознавая эти ограничения и, поэтому, не придерживаясь слепо рекомендаций, полученных игровыми методами, можно все же разумно использовать аппарат теории игр как «совещательный» при выборе решения.

Пример 1. Рассмотрим числовой пример игры с нулевой суммой. Предполагается, что результатом игры является плата, которую в соот-

ветствии с правилами проигравший платит выигравшему. Ради простоты ограничимся рассмотрением одноходовых игр, в которых участвуют два игрока *A* и *B*, причем проигрыш одного, например, *B*, равен выигрышу другого, т. е. *A*. Чтобы полностью определить такую игру, нужно задать таблицу платежей – платежную матрицу. Поясним это на примере.

Пусть задана следующая платежная матрица (таблица 16), известная обоим игрокам. Игрок *A* должен выбрать одну из строк матрицы (ход). Игрок *B*, не зная результата его выбора, должен выбрать один из столбцов. Число, стоящее на пересечении выбранных ими строки и столбца, определяет выигрыш игрока *A*. Выигрыш игрока *B* равен этому же числу с обратным знаком. Например, если *A* выбрал вторую строку, а *B* – третий столбец, то *A* выигрывает, а *B* проигрывает пять единиц. Будем считать, что игроки осторожны и целью каждого из них является максимизация наименьшего возможного (гарантированного) выигрыша.

Таблица 16

Матрица игры с нулевой суммой

Игроки		*B*			
		ход 1	ход 2	ход 3	ход 4
A	ход 1	5	4	8	9
	ход 2	0	–2	5	7
	ход 3	1	–1	3	6

Если мы выбираем природу в качестве противника, то решение, полученное с помощью игровых моделей позволяет минимизировать возможный ущерб.

Основной вопрос, который возникает в теории игр, состоит в следующем: существует ли наилучший способ игры для каждого из игроков, т. е. имеются ли у них оптимальные стратегии? Сразу видно, что игроку *A* выгоднее всего выбирать ход 1, так как элементы первой строки соответственно больше элементов второй и третьей строк. Точно так же игроку *B* выгоднее всего выбирать ход 2, так как элементы второго столбца соответственно меньше элементов остальных столбцов.

В теории игр доказано следующее правило: если наибольший из минимальных выигрышей для *A* в точности равен наименьшему из возможных максимальных проигрышей для *B*, т. е. если минимум в какой-нибудь строке платежной матрицы совпадает с максимумом в соответствующем столбце, то эти строка и столбец являются оптимальными чистыми стратегиями игроков. Точка их пересечения называется седловой точкой платежной матрицы. В примере 1 седловой точкой является число 4.

Следовательно, благодаря специфическому свойству данной платежной матрицы – наличию в ней седловой точки, найдены оптималь-

ные чистые стратегии игроков A – всегда выбирать ход 1, B – ход 2. Число 4 в этом случае носит название цены игры. Смысл этого термина такой: цена игры – это та плата, которую получает оптимально играющий игрок, играя с другим оптимально играющим игроком. Ясно, что ход 1 игрока A обеспечивает ему выигрыш не менее 4, а ход 2 игрока В гарантирует ему проигрыш не более 4 (игроки A и B не обязательно равноправны).

Но далеко не каждая платежная матрица имеет седловую точку.

Пример 2. Саша и Лиза условились встречаться зимой возле кинотеатра. Если Саша придет раньше назначенного времени, то Лизы еще не будет, и ему придется мерзнуть. Потери Саши в этом случае можно оценить числом –1. Если раньше придет Лиза, то ему будет еще хуже: потери равны –4. В том случае, когда оба приходят одновременно (поздно или рано), потерь нет ни у кого. Как быть Саше и Лизе?

Считая, что перед нами игра двух лиц с нулевой суммой, прежде всего составим платежную матрицу (таблица 17).

Таблица 17

Матрица игры, не имеющая седловой точки

Игроки		Лиза	
		Прийти рано	Прийти поздно
Саша	Прийти рано	0	–1
	Прийти поздно	–4	0

Будем искать оптимальные стратегии участников при многократных встречах. Сначала проверим, нет ли у матрицы седловых точек. Оказывается, что нет. (Минимум в каждой строке отрицателен, а максимумы в столбцах равны 0.) Значит, наверняка существуют оптимальные смешанные стратегии для каждого из них.

Пусть Саша выбирает ход «прийти рано» с частотой x, а ход «прийти поздно» – с частотой $1–x$. Аналогично для двух ходов Лизы обозначим частоты ее выбора через y и $1–y$. Средний выигрыш, который получит Саша при многократных свиданиях, составляет: $W(x,y) = –4\cdot y\cdot(1–x) + (–1)\cdot x\cdot(1–y) + 0\cdot x\cdot y + 0\cdot(1–x)\cdot(1–y) = 5\cdot x\cdot y – x–4\cdot y$. Тогда средний выигрыш Лизы составит: $–W(x,y) = –5xy + x + 4y$. Величину x Саше нужно подобрать так, чтобы выигрыш $W(x,y)$ достиг максимума. Аналогично Лизе – подобрать y, чтобы $–W(x,y)$ был максимален. Вычисляем производную функции W по x и, приравнивая ее нулю, получаем: $5y – 1 = 0$. Производную $–W$ по y также приравниваем нулю: $5x – 4 = 0$. Отсюда можно найти x и y. Ответ: $x = 4/5$, $y = 1/5$.

Полученный результат объясняется так: Саша должен приходить к кинотеатру в четырех случаях из пяти раньше назначенного времени, т. е. каждый раз случайно именно с этими вероятностями принимать

решение. Лиза же, наоборот, в четырех случаях из пяти должна опаздывать. Оптимальные смешанные стратегии найдены. Тогда ее средний выигрыш составит – $W = -5 \cdot 4/5 \cdot 1/5 + 4/5 + 4 \cdot 1/5 = 4/5$. Любое отклонение от смешанной стратегии для Лизы приведет к снижению ее среднего выигрыша (снижение проигрыша для Саши). Аналогичны вредные последствия отклонения от своей смешанной стратегии для Саши.

Пример 3. В данном случае в центре анализа стоит простая матрица, показывающая, какие стратегии могут применять оба игрока, и исходы всевозможных комбинации этих стратегий. Пример такой матрицы приведен в таблице 18, дающей возможные исходы игры с точки зрения человека, который не может вспомнить, является ли сегодняшний день днем рождения его жены! Он может применить две стратегии: либо купить цветы, либо прийти домой без цветов. У природы здесь тоже две стратегии, т. е. день рождения жены либо сегодня, либо в другой день.

Таблица 18

Матрица игры, указывающая стратегии и исходы для задачи «Не сегодня ли день рождения жены?»

Игроки		Природа	
		День рождения не сегодня	День рождения сегодня
Муж	Без цветов	0	–10
	С цветами	1	1,5

Числа в таблице показывают исход игры с точки зрения мужа для каждой комбинации стратегий двух игроков. В соответствии с ними, если муж приходит домой без цветов и день рождения жены не сегодня, исход игры для него нулевой – он ничего не выигрывает и ничего не проигрывает. Если же он приходит без цветов, но день рождения жены именно сегодня, муж проигрывает достаточно много (–10), так как он забыл нечто, о чем следовало бы хорошо помнить. Если муж приходит домой с цветами, но день рождения не сегодня, имеется весьма скромный выигрыш, ценность которого, быть может, слегка уменьшается из-за ощущения, что он сделал нечто, чего мог бы и не делать. Если муж приходит домой с цветами и день рождения его жены именно сегодня, выигрыш нескольку больше (1,5), так как муж вспомнил о том, чего в общем-то и не должен был забывать. Можно показать, что данная игра обладает той характерной особенностью, которая в теории игр называется «седловой точкой». Попросту говоря, когда наибольший из минимумов по строке совпадает с наименьшим из максимумов по столбцу, игра имеет седловую точку и игрокам всегда следует придерживаться той чистой стратегии, которая стоит на пересечении соответствующих

строки и столбца. В данной игре мужу в любом случае следует прийти домой с цветами!

Поиск седловых точек является весьма важным моментом теории игр. Вероятность того, что эти седловые точки будут существовать у случайно выбранной матрицы, велика для матриц невысоких порядков. В тех же случаях, когда никакой седловой точки не существует, можно показать, что решение следует искать в смешанных стратегиях. Это означает, что должны применяться две или более стратегии и что вероятности, с какими данные стратегии применяются, могут быть вычислены по матрице игры. Каждый раз во время игры выбор стратегии должен осуществляться случайно, но с фиксированными вероятностями для соответствующих стратегий.

Описанный выше пример взят из книги Дж. Вильямса «Совершенный стратег или букварь по теории стратегических игр» [2]. Эта книга служит прекрасным введением в теорию игр, написанным в увлекательной и остроумной форме с множеством практических примеров.

Уточним, почему мы рассматриваем природу как злостного противника, стремящегося минимизировать выигрыш партнера, будь то человек, животное или растение. В ситуациях, когда у нас не хватает знаний о реакции живых организмов или внешней среды на выбор стратегий, которые будут давать наилучший результат хотя бы в среднем, стоит применять некую комбинацию стратегий, консервативную в том смысле, что она минимизирует ущерб, причиняемый при наихудших стратегиях, которые может применить природа.

Далее обсудим критерии успеха в играх вообще и в играх с природой, в частности.

Вернемся к одному из трудных вопросов: для данной конкретной ситуации построить отвечающую ей целевую функцию. Его решение выходит за рамки теории игр и относится уже к теории полезности.

Во многих экономических задачах подходящими по смыслу целевыми функциями являются прибыль или убыток. Наиболее простая цель – это отыскание максимального среднего дохода или минимального среднего убытка. Предполагаем, что доход зависит от случайно реализовавшегося состояния природы. Тогда средний (по возможным состояниям погоды) доход, точнее, математическое ожидание дохода, определяется как сумма величин дохода, умноженных на вероятности появления тех состояний природы, которые этим доходам соответствуют.

Этот критерий применяется далеко не всегда, так как доставляемая им информация слишком усреднена. Как уже отмечалось, часто каждое действие оценивается по наихудшему для него состоянию природы. Оптимальным действием считается то, которое приводит к наилучшему результату при наихудшем состоянии. Такой критерий качества

управления носит название максиминного критерия. Ясно, что максиминная стратегия обеспечивает наилучший ответ на наихудшее состояние природы, т. е., по сути, это стратегия осторожного, пессимистичного игрока.

Вместо того чтобы рассматривать платежную матрицу при выборе решения в условиях неопределенности, часто используют разумно построенную матрицу риска, т. е. потерь при разных ходах человека и состояниях природы. Тогда к матрице риска может применяться минимаксный критерий, т. е. выбирается то действие, которое делает наименьшим максимальный риск. Это тоже осторожная стратегия.

Возможны и другие критерии, учитывающие не наихудшее, а наилучшее состояние природы, комбинации наилучшего и наихудшего и т. п. Какой критерий выбрать, зависит от конкретной задачи и от человека, который ее решает. Целевая функция зачастую находится в сильной зависимости и от искусства решающего, и от некоторых черт его характера (например, пессимист он или оптимист).

Список литературы

1. *Вентцель, Е. С.* Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е. С. Вентцель. – 2-е изд., стер. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

2. *Вильямс, Дж. Д.* Совершенный стратег, или Букварь по теории стратегических игр / Дж. Д. Вильямс. – М.: Советское радио, 1960. – 266 с.

3. *Джефферс, Дж.* Введение в системный анализ: применение в экологии / Дж. Джефферс; пер. с англ. Д. О. Логофета; под ред. и с предисл. Ю. М. Свирежева. – М.: Мир, 1981. – 256 с.

4. *Ледли, Р.* Медицинская диагностика и современные методы выбора решения / Р. Ледли, Л. Ластед // Математические проблемы в биологии. – М., 1966. – С. 141–197.

5. *Леньков, И. И.* Экономико-математическое моделирование систем и процессов в сельском хозяйстве / И. И. Леньков. – Минск: ДизайнПРО, 1997. – 304 с.

6. *Мамеева, В. Е.* Системный анализ и основы моделирования экосистем: учебно-методическое пособие к лабораторно-практическим работам для студентов, обучающихся по специальности 110102 «Агроэкология» / В. Е. Мамеева. – Брянск: Изд-во Брян. ГСХА, 2011. – 132 с.

7. *Петракова, Н. В.* Основы математического моделирования. Модели. Методы. Примеры / Н. В. Петракова. – Брянск: Изд-во Брян. ГСХА, 2011. – 162 с.

8. *Пугачёва, И. Г.* Методы экологических исследований и моделирование экосистем. Лабораторный практикум: учебное пособие / И. Г. Пугачёва, Н. Ю. Лещина, И. Н. Таранова. – Минск: РИВШ, 2017. – 140 с.

9. *Смиряев, А. В.* Моделирование: от биологии до экономики: учебное пособие для студентов специальности «Селекция и генетика сельскохозяйственных культур» / А. В. Смиряев, А. В. Исачкин, Л. К. Харрасова. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 122 с.

ГЛАВА 5
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

5.1. Моделирование роста в экологии

5.1.1. Скорость роста как функция биомассы

При изучении развития животных и растительных организмов используют функции роста, т. е. математические выражения, в которых взаимосвязаны экспериментальные данные, относящиеся к росту организма или его части.

Использование функций роста обычно имеет эмпирическую основу: вид зависимости часто подбирают исходя из анализа имеющегося экспериментального материала. Предпочтительно при этом попытаться выбрать или построить такую функцию, которая отличалась бы определенным биологическим правдоподобием и интерпретируемостью параметров, т. е. отображала бы лежащие в основе изучаемого процесса физиологические и биохимические механизмы и ограничения. Так, автокатализ хорошо описывается кривой экспоненциального роста, рост в условиях дефицита питательных веществ – асимптотической кривой, старение или другие видоизменения организма, снижающие темп его роста, – уравнением Гомпертца. Ученые уже давно не питают наивных надежд отыскать универсальную аналитическую функцию, которая удовлетворительно описывала бы рост растения или животного в широком диапазоне внешних условий. Сейчас уже не вызывает сомнений тот факт, что дать простое описание такой сложной системы, как растение или животное, практически невозможно. Поэтому при построении моделей используют две или более зависимостей, содержащих много параметров и основанных на применении различных численных методов и имитаций.

При моделировании роста целесообразно за единицу измерения времени принимать день, а за единицу измерения массы – килограмм. Например, для описания функции роста, связывающей в общем виде массу сухого вещества W и время t, можно использовать формулу $W = f(t)$, где f – определенная функциональная связь.

При анализе динамики количества сухого вещества W вводится понятие темпа или скорости роста, т. е. производной dW/dt. Тогда скорость накопления сухого вещества можно выразить через $dW/dt = h(W)$, где h – некоторая функция биомассы.

5.1.2. Уравнения роста

Самая простая модель роста может быть представлена замкнутой системой, для которой верно, что на рассматриваемом отрезке времени она не получает из внешней среды и не теряет никакого материала, т. е. предполагается, что материал субстрата S переходит в сухое вещество W без потерь:

Субстрат S $\xrightarrow{\text{рост}}$ Сухое вещество W

Тогда:

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{dS}{dt};$$

$$\frac{dW}{dt} + \frac{dS}{dt} = \frac{d(W+S)}{dt} = 0;$$

$$W + S = const = W_0 + S_0 = W_t = S_t = C,$$

где W_0 и S_0 – исходные значения W и S в момент $t = 0$; W_t и S_t – значения, к которым приближаются эти параметры при $t \to \infty$ (при условии, что система со временем приходит в стабильное состояние); C – постоянная величина.

Представим темп роста сухого вещества в виде функции h (W):

$$\frac{dW}{dt} = h(W),$$

где h – функция только одной переменной состояния. Важно решить, какую функцию использовать в качестве h.

Далее рассмотрим различные предположения относительно функции h, т. е. несколько вполне определенных уравнений роста, каждое из которых можно интерпретировать в терминах описанной модели.

5.1.3. Простой экспоненциальный рост с резкой отсечкой

Принимаются следующие допущения:

1) темп роста пропорционален количеству сухой массы W (чем больше биомасса, тем больше ее прирост);

2) темп роста максимален, пока существует питательная среда;

3) рост необратим и прекращается с истощением среды.

Простой экспоненциальный рост, ограниченный реальными ресурсами окружающей среды, графически представлен на рисунке 27.

Уравнение роста записывают следующим образом:

$$\frac{dW}{dt} = \mu \cdot W,$$

где μ – параметр (удельный или относительный темп роста сухой массы). Он зависит от вида сухой массы и от скорости, с которой «работает» механизм роста.

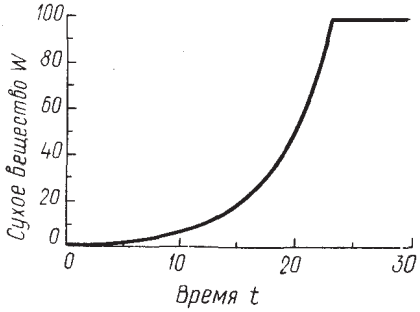


Рис. 27. **Простой экспоненциальный рост с резкой отсечкой. Кривая задана при $W_0 = 1$, $W_f = 100$, $\mu = 0{,}2$ и $t_f = 23$**

Проинтегрировав уравнение

$$\frac{dW}{dt} = \mu \cdot W,$$

получаем:

$$W = W_0 \times e^{\mu t} \text{ при } 0 \le t \le t_f,$$

$$W = W_f \text{ при } t > t_f.$$

Когда $W = W_f$, $S = 0$, то $W_f = W_0 + S_0$.

Рост внезапно прекращается, когда

$$t_f = \frac{\ln[(W_0 + S_0) : W_0]}{\mu}.$$

5.1.4. Мономолекулярное уравнение роста

Мономолекулярное уравнение роста описывает ход простой необратимой химической реакции первого порядка. Принимаются следующие допущения:

1) количество энергии роста неизменно и не зависит от количества биомассы;

2) скорость роста пропорциональна ресурсам питательной среды S;

3) рост необратим.

Вместо $\frac{dW}{dt} = \mu \cdot W$ имеем $\frac{dW}{dt} = kS$,

где k – постоянная величина.

Учитывая, что $S(f) = 0$ и $S = W_f - W$, получаем:

$$\frac{dW}{dt} = k(W_f - W).$$

Проинтегрируем правую и левую части:

$$\int \frac{dW}{W_f - W} = kdt \qquad \int \ln\frac{W_f - W_0}{W_f - W} = kt.$$

Последнее выражение можно записать так:

$$W = W_f - (W_f - W_0)\cdot e^{-kt},$$

поскольку логарифм – это степень, в которую возводим основание.

Если $W_0 = 0$, то $W = W_f(1 - e^{-kt})$.

Эта зависимость графически представлена на рисунке 28.

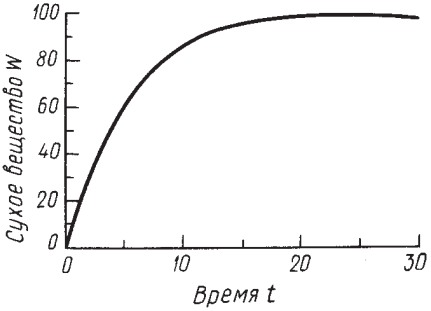


Рис. 28. **Мономолекулярный рост. Кривая задана при $W_0 = 1$, $W_f = 100$, $k = 0{,}2$**

Темп роста непрерывно снижается, и кривая роста не имеет точки перегиба.

5.1.5. Логистическое уравнение роста в замкнутой системе

Предыдущие модели роста описывали две крайние ситуации:

1) темп роста зависит только от биомассы и не зависит от ресурса питательной среды;

2) темп роста зависит только от ресурса питательной среды и не зависит от биомассы.

При выводе уравнения логистического роста делается двоякое допущение:

1) энергия роста пропорциональна сухой массе *W;*

2) скорость роста пропорциональна ресурсам питательной среды *S;*

3) рост необратим.

Тогда $\frac{dW}{dt} = rWS$, где r – постоянная величина.

Учитывая, что $S = W_f - W$, $S_t = 0$, можно получить $\frac{dW}{dt} = rW(W_f - W)$.

После преобразования и перехода от величины k к уже известному параметру μ получим логистическое уравнение в виде

$$W = \frac{W_0 \cdot W_f}{W_0 + (W_f - W_0)e^{-\mu t}} .$$

Для малых значений t (начальные этапы роста) и $W_0 << W_f$ (когда $W_0 \approx 0$) справедливо приближенное равенство:

$$W \approx W_0 \cdot e^{-\mu t}.$$

Это значит, что при указанных условиях имеет место экспоненциальный рост с начальным темпом μ. При $t \to \infty$ и $W \to W_f$ процесс роста носит ассиптотический характер (т. е. на определенном участке график приближается к прямой – касательной к графику) (рисунок 29).

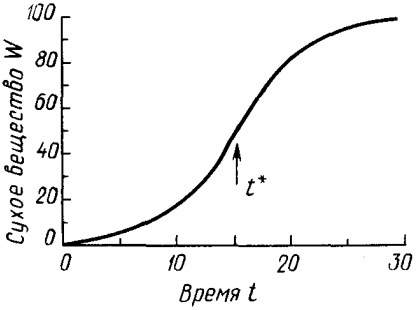


Рис. 29. **Логистический рост**

Кривая задана при $W_0 = 1$, $W_f = 100$, $\mu = 0{,}3$, $t^* = 15{,}32$. Через t^* обозначена точка перегиба, которая существует при $W = \frac{1}{2}W_f$.

Точка перегиба соответствует моменту времени $t = t^*$:

$$t^* = \frac{1}{\mu}\ln\frac{(W_f - W_0)}{W_0} .$$

5.1.6. Кривая роста Гомпертца

Принимаются следующие допущения:

1) питательная среда не ограничена;

2) энергия роста пропорциональна сухой массе W (коэффициент пропорциональности μ);

3) эффективность энергии роста падает со временем, спад носит экспоненциальный характер (причины спада – деградация, развитие или старение вместо роста).

При выражении этих допущений в виде формулы получается $\frac{dW}{dt} = \mu \cdot W$, но теперь μ не является постоянной величиной, а изменяется по закону

$$\frac{d\mu}{dt} = -D\mu,$$

где D – дополнительный параметр, характеризующий уменьшение μ (интенсивность или темп деградации).

Проинтегрируем это уравнение:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-Dt},$$

где μ_0 – значение μ в момент $t = 0$.

Подставим μ в основное уравнение: $\frac{dW}{dt} = \mu_0 \cdot W \cdot e^{-Dt}$.

После преобразований получим:

$$W = W_0 \, exp \, [\, \mu_0(1 - e^{-Dt}) / D] \, .$$

При малых значениях t (в начальный момент времени) $e^{-Dt} \approx 1 - Dt$, т. е. рост носит экспоненциальный характер: $W \approx W_0 \cdot e^{\mu_0 t}$.

Эта зависимость графически представлена на рисунке 30.

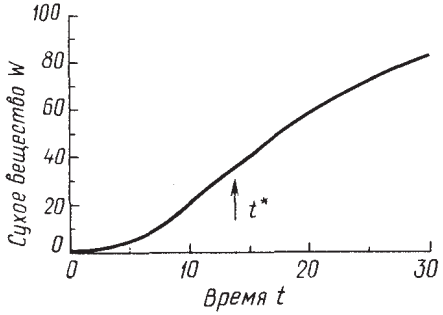


Рис. 30. **Функция роста Гомпертца.**
Кривая задана при $W_0 = 1$, $W_f = 100$, $\mu = 0{,}5$, $D = 0{,}1086$

Особенностью функции роста Гомпертца является то, что точка перегиба соответствует не половине результирующей массы, а массе, кривая которой меньше результатирующей в $\underline{e}$ раз.

В сравнении с логистическим ростом при одних и тех же значениях исходной и результирующей массы и близких значениях времени, со-

ответствующего точке перегиба, кривая Гомпертца отражает более быстрый рост в начальной фазе, более протяженный линейный участок около точки перегиба.

5.1.7. Уравнение роста Ричардса

Основным преимуществом уравнения роста Ричардса является его универсальность: при определенных значениях дополнительного параметра n функция Ричардса превращается в одно из рассмотренных ранее уравнений роста: при $n = -1$ – мономолекулярное, при $n = 1$ – логистическое, при $n = 0$ – Гомпертца.

Дифференциальное уравнение для функции Ричардса:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{kW(Wt^n - W^n)}{nW_f^n},$$

где k, n и W_f – постоянные величины; k и W_f – положительны; $n \geq -1$.

Эта зависимость графически представлена на рисунке 31.

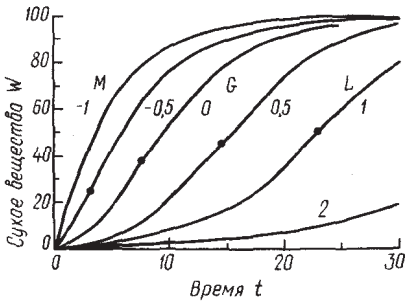


Рис. 31. **Функция роста Ричардса. Кривые заданы при $W_0 = 1$, $W_f = 100$, $\mu = 0{,}2$; для шести значений параметра n (–1…2) при разных значениях получим шесть кривых**

В отличие от предыдущих уравнений, точка перегиба может соответствовать любой доле результирующей сухой массы. Это объясняется тем, что n изменяется в пределах $-1 < n < \infty$.

5.1.8. Экспоненциальные полиномы и описание роста

Уравнения этого класса основываются на более сложных допущениях, чем предыдущие, являются эмпирическими и их сложно интерпретировать. Экспоненциальные полиномы записывают в следующем виде:

$$W = \exp(a_o + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + \ldots a_n t^n),$$

где a_0, a_1 … a_n – постоянные коэффициенты.

В моделях роста живых систем целесообразно использовать квадратичные полиномы, с помощью которых можно рассчитать a_0, a_1, a_2 ($a_3 = a_n = \ldots = 0$). Приблизительно определить эти параметры можно следующим образом:

$$a_0 = \ln W_0, \quad a_1 = \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dt}, \quad a_2 = -\left(\frac{a_1^2}{4}\right) / \left[\ln\left(\frac{W_f}{W_0}\right)\right].$$

Типичная экспоненциально-квадратичная кривая изображена на рисунке 32.

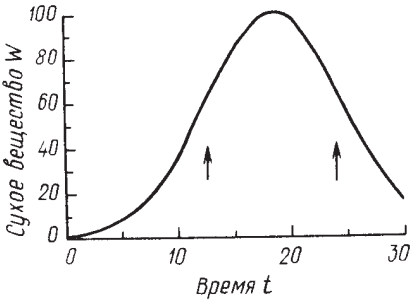


Рис. 32. **Экспоненциально-квадратичная функция роста. Кривая задана при $a_0 = 0$, $a_1 = 0{,}5$, $a_2 = -0{,}0136$, $a_3 = a_4 = \ldots = 0$, $W_0 = 1$, $W_f = 100$**

Моменты перегиба t^* располагаются симметрично моменту времени, соответствующему максимуму сухой массы:

$$t^* = -\frac{a_1}{2a_2} \pm \frac{1}{(-2a_2)^{1/2}}.$$

В экологических моделях кривая не может рассматриваться целиком, нужно пользоваться лишь частью этого графика, полагая, что он обрывается где-то в районе точки максимума.

Обычно экспоненциальные полиномы используются исключительно для аппроксимации зависимостей, построенных на экспериментальном материале. Но в одной из работ Р. Торнли показано, что экспоненциально-квадратичная функция хорошо описывает закон изменения числа клеток меристематической ткани, когда вероятность образования продуктов клеточного деления падает по экспоненте в зависимости от количества остающейся меристемы.

5.1.9. Аллометрические уравнения при описании роста

Аллометрическая зависимость впервые была использована В. Перселлом [1] в связи с описанием роста растений, а затем Дж. Хаксли [2] для прогнозирования роста животных и частей их организма.

Предположим, что P и Q – некоторые свойства организма (количественные характеристики). Например, P и Q – массы различных частей животного или P – сухая масса растения, Q – площадь поверхности листьев. Поскольку организм растет и развивается, то P и Q будут изменяться с течением времени: $P = P(t)$; $Q = Q(t)$.

Аллометрическая зависимость выражается следующим образом:

$$P = a \cdot Q^b,$$

где a и b – постоянные коэффициенты.

P и Q изменяются во времени таким образом, что соотношение сохраняет справедливость на всем интервале наблюдения.

Уравнение симметрично по отношению к P и Q, следовательно,

$$Q = c \cdot P^d,$$

где $c = \left(\frac{1}{a}\right)^{1/b}$ и $d = \frac{1}{b}$.

При описании роста растений зависимость $A = a \cdot W^b$ используется для установления связи между поверхностью листьев и сухой массой растения.

При моделировании роста животных аллометрия используется чаще. Например, С. Броди установил, что в процессе роста тела животного площадь его поверхности растет относительно быстрее, чем линейные размеры, а масса (объем) растет относительно быстрее, чем площадь поверхности. Другими словами, линейные размеры, площадь и масса тела животного связаны аллометрически.

С. Броди использовал аллометрическое уравнение для оценки зависимости массы животного от размера в обхвате; количества шерсти (перьев) – от живой массы; массы отдельных органов – от массы всего тела.

Применение уравнений этого типа ограничено, так как при определенных достоинствах эмпирического характера метод обладает низкой способностью к интерпретации.

Список литературы

1. *Франс, Дж.* Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Торнли. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

2. *Huxley, J. S.* Constant differential growth rations / J. S. Huxley. – London: Nature, 1974. – Vol. 114. – P. 895–986.

3. *Pearsall, W. H.* Growth studies. VI. On the relative sizes of growing plant organs / W. H. Pearsall // Annals of Botany. – 1927. – Vol. 41. – P. 549–556.

5.2. Биоразнообразие в системе, его моделирование

5.2.1. Измерение и оценка биологического разнообразия

Контроль над биологическим разнообразием требует его измерения, а измерение только тогда становится возможным, когда качественные признаки могут быть описаны количественно, в величинах, которые можно сравнивать.

На уровне интуиции кажется, что разнообразие сообщества тропического леса больше разнообразия сообщества тайги. Однако видимая простота оценки разнообразия не позволяет удовлетвориться качественными сравнениями: более разнообразное и менее разнообразное сообщество. В экологии и математике разработано множество моделей и индексов для измерения разнообразия, которые требуют различной интерпретации.

Оценивание биологического разнообразия имеет важное прикладное значение, так как:

1) позволяет контролировать сохранение генетического потенциала;

2) дает представление о состоянии экосистем на определенной территории;

3) служит основой для разработки системы менеджмента отдельных видов.

5.2.2. Параметры биологического разнообразия (альфа-разнообразие)

Одна из важных задач экологии – оценка разнокачественности, разнообразия сообществ [7]. Любое сообщество – не просто сумма образующих его видов, но и совокупность взаимодействий между ними. Одним из важных свойств сообщества, которое отражает его сложность и структурированность, принято считать его разнообразие. Видовое разнообразие отражает сложность строения и структуру сообщества. Понятие «биоразнообразие», хотя и является сложным, многогранным и достаточно неопределенным, описывается двумя компонентами: число видов и относительное обилие видов.

Разнообразие принято оценивать либо путем подсчета видов, измерения их относительного обилия, либо мерой, объединяющей эти два компонента. Однако оценка разнообразия только простым подсчетом видов малоинформативна, так как ни одно сообщество не состоит из видов равной численности. Из общего числа видов какого-либо трофического уровня или сообщества в целом обычно лишь немногие бывают доминирующими, т. е. имеют значительную численность (большую биомассу, продуктивность или другие показатели), подавляющая же часть относится к редким видам (т. е. имеет низ-

кие показатели «значимости»). Таким образом, большинство видов в сообществе малочисленны, численности других умеренны и лишь немногие обильны.

При оценке альфа-разнообразия принимаются во внимание два фактора: видовое богатство и выравненность обилий видов.

Видовое богатство – число видов, для сравнения отнесенное к определенной площади.

Выравненность – равномерность распределения видов по их обилию в сообществе.

Видовое разнообразие в разных местах часто зависит от шкалы измерения разнообразия. Например, в 1 $м^2$ полуестественных европейских пастбищ может быть больше видов, чем в нижнем ярусе дождевого тропического леса в бассейне Амазонки. Разнообразие видов на 1 $км^2$ и более будет выше в тропическом лесу. Видовое разнообразие увеличивается при увеличении размеров изучаемой площади. Р. Маргалеф на примере изучения планктонных сообществ показал, что при увеличении объема выборки разнообразие также увеличивается.

Распределение видового богатства на Земле меняется по долготе, высоте над уровнем моря, в градиенте увлажнения, солености, содержания калия в почве и др. Видовое разнообразие увеличивается при продвижении от высоких широт к экватору. Максимум видового разнообразия наблюдается в большинстве случаев в мезофитных сообществах. В сообществах, подвергающихся стрессовым воздействиям, видовое разнообразие уменьшается; но, кроме того, оно может снижаться в результате обострения видовой конкуренции в климаксовых сообществах, существующих в стабильной физической среде.

Высокую выравненность принято считать эквивалентной высокому разнообразию. Например, в двух выборках может быть равное число видов и особей, большая выравненность одной из выборок делает ее разнообразие более высоким. Выравненность максимальна, если все виды в сообществе имеют равное обилие, и минимальна, когда один вид имеет обилие, превышающее обилие всех остальных видов, которые имеют только по единице обилия.

Выравненность – это единственный серьезный показатель структуры сообщества. Выравненность, как правило, высока и постоянна среди популяций птиц (это может быть объяснено их территориальным поведением), а различия этого показателя в разных сообществах и географических зонах определяются, главным образом, видовым богатством. Напротив, у растений и фитопланктона выравненность в среднем низкая, и оба компонента подвержены значительным вариациям.

5.2.3. Методы построения графиков видового обилия

Наилучший способ представить оба компонента разнообразия – построить график. Графический анализ биоразнообразия преследует цель выявить закономерности распределения видов в сообществе через обилие и выравненность.

При анализе биоразнообразия применяют два типа графиков: графики «ранг/обилие» и графики частотного распределения.

График «ранг/обилие» – один из способов представления данных по обилию видов. По оси абсцисс откладывают ранг (порядковый номер вида в ранжированном ряду), а по оси ординат – обилие вида (число особей). Линия, соединяющая точки или проходящая близко от них, называется кривой доминирования-разнообразия или важности видов. Ее можно использовать для оценки различий в видовой структуре: чем круче падает кривая, тем меньше общее разнообразие (в смысле выравненности) и сильнее доминирование одного или нескольких видов. Так, на рисунке 33 видны очевидные отличия в крутизне кривой между группами измерений 1–2 и 5–6. Значительно труднее проследить экологический смысл кривой значимости видов для измерения 3, характеризующегося наличием одного субдоминантного вида и максимальным видовым богатством, и для измерения 4 с очень низким числом видов, но феноменальной выравненностью.

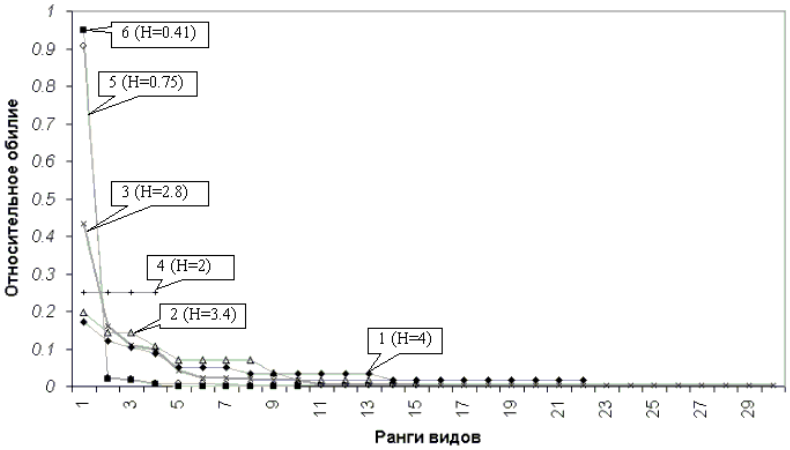


Рис. 33. **Кривые доминирования-разнообразия для шести измерений численности макрозообентоса (*H* – индекс разнообразия Шеннона)**

На ранговом распределении основаны три нижеприведенные модели описания видового обилия.

Модель геометрических рядов строится исходя из предположения, что вид-доминант захватывает часть k некоего ограниченного ресурса, второй по обилию вид захватывает такую же долю k остатка этого ресурса, третий по обилию – k от остатка и т. д., пока ресурс не будет разделен между всеми S видами. Если это условие выполнено и обилия видов (выраженные, например, их биомассой или числом особей) пропорциональны используемой доле ресурса, распределение этих обилий будет описываться геометрическим рядом (или гипотезой преимущественного захвата экологической ниши). Такое распределение в координатах «ранг/обилие» представлено прямой, угол наклона которой зависит от константы геометрической прогрессии k.

Модель «разломанного стержня» описывает монотонное изменение обилий видов в ранжированном ряду, причем величина k не является постоянной, а изменяется на каждом шаге по некоторому нелинейному закону. В этом случае по оси ординат откладывается относительное обилие в линейном масштабе, а по оси абсцисс – порядок видов (ранг) в логарифмическом масштабе от наиболее к наименее обильным (обратное ранговое распределение). Считается, что S видов особым образом разделяют среду между собой так, что они занимают неперекрывающиеся экологические ниши, причем число особей каждого вида пропорционально размеру (ширине) выделенного объема гиперпространства факторов. Р. Макартур сравнил разделение пространства ниши в пределах сообщества со случайным и одновременным разламыванием стеклянного стержня на S кусков при падении на пол, поэтому это распределение часто называют моделью разломанного стержня.

Гиперболическая модель теоретически выводится из модели структуры сообщества, лимитированного потребляемыми ресурсами, при логарифмическом распределении потребностей отдельных видов. Приводит к более неравномерному распределению обилия, чем предыдущие модели. Гиперболическая модель лучше описывает более сложные, «целостные» сообщества, выборки большего объема или усредненные по времени или пространству данные. Интерпретация модели аналогична модели геометрических рядов, однако, согласно гиперболической модели, обилия первых видов убывают более резко, а обилия редких видов – более плавно (первая предполагает линейную, а вторая – логарифмическую зависимость потребности в лимитирующих факторах от ранга).

Две других основных модели распределения значимости видов основаны на **графиках частотного распределения** (рисунок 34), которые отображают зависимость между числом особей (ось абсцисс) и числом видов (ось ординат), которые соответствуют этой численности.

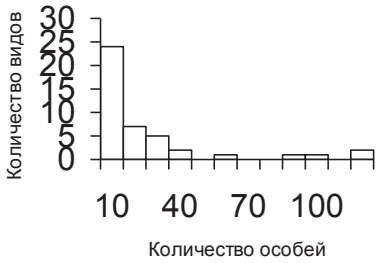


Рис. 34. **Зависимость между количеством особей каждого вида и количеством видов**

Логнормальное распределение Престона. Сначала следует прологарифмировать численность экземпляров (log2N) и разделить их на диапазоны, тогда в первый попадут виды, представленные 1–2 особями, во второй – 3–4 особями, в третий – 5–8 особями и т. д., т. е. максимальное граничное значение каждого диапазона получается удвоением предыдущего.

Если построить частотную гистограмму числа видов, соответствующих каждому диапазону, то полученные точки хорошо аппроксимируются гауссовой кривой нормального распределения. Однако если данные получены из ограниченной выборки, то левая часть кривой (т. е. редкие, неучтенные виды) будет выражена нечетко (рисунок 35). Только при огромном количестве данных, полученных при одновременном изучении многих классов организмов и собранных на обширных биогеографических территориях, прослеживается полная кривая нормального распределения.

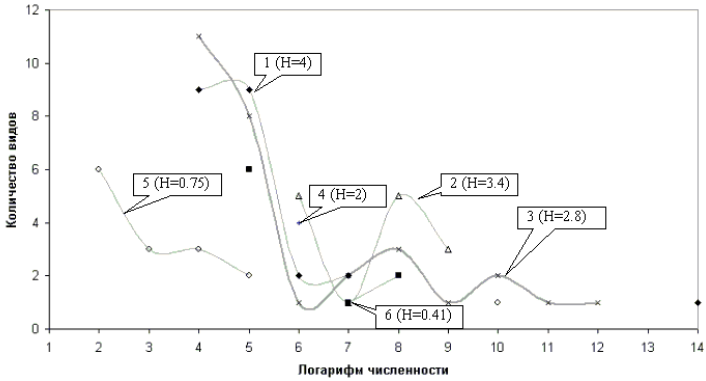


Рис. 35. **Графики частотного распределения Престона для шести измерений численности макрозообентоса (*H* – индекс разнообразия Шеннона)**

Логарифмические серии Фишера. Группа английских математиков и энтомологов с участием Р. Фишера первой попыталась описать отношение между числом видов и числом особей этих видов. Они предложили аппроксимировать это отношение при помощи логарифмического распределения. Логарифмическими сериями, ряд которых характеризуется малым числом обильных видов и большой долей «редких», с наибольшей вероятностью можно описать такие сообщества, структура которых определяется одним или немногими экологическими факторами. Например, распределение обилий видов растений наземного яруса в хвойных лесах в условиях низкой освещенности.

Различные типы графических построений подчеркивают те стороны объектов, которые стремятся выделить экологи. График, наилучшим образом соответствующий модели «разломанного стержня», показывает равномерное распределение обилий; в случае геометрического ряда график должен демонстрировать присутствие немногих доминантов и многих редких видов; Гауссова кривая при логарифмически нормальном распределении привлекает внимание к видам со средним обилием.

5.2.4. Индексы биоразнообразия

В настоящее время предложено более 40 индексов, которые предназначены для оценки биоразнообразия. Индексы, применяемые в анализе разнообразия сообществ, должны удовлетворять следующим требованиям [5]:

1) разнообразие сообщества тем выше, чем больше в нем количество видов;

2) разнообразие сообщества тем выше, чем выше его выравненность.

Большинство различий между индексами, измеряющими биоразнообразие, заключается в том, какое значение они придают выравненности и видовому богатству.

Индексы видового богатства. Важной мерой оценки разнообразия для ограниченного в пространстве и во времени сообщества, для которого точно известно число составляющих его видов и особей, является видовое богатство. Однако в большинстве случаев исследователь имеет дело с выборкой, не располагая полным списком видов сообщества. В этом случае необходимо использовать «нумерическое видовое богатство», т. е. число видов на строго оговоренное число особей или на определенную биомассу, и видовую плотность.

Видовая плотность (например, на 1 м^2) – наиболее распространенный показатель видового богатства, особенно среди ботаников и почвенных зоологов. Показатель «нумерическое видовое богатство» используется реже, хотя его применение более популярно при исследовании

водных объектов. Например, при исследовании экологических воздействий на сообщества рыб можно использовать показатель «число видов на 1000 рыб».

Не всегда можно добиться равного размера всех выборок. Но следует всегда помнить, что при увеличении объема выборки число видов всегда растет.

Различные сочетания S (число выявленных видов) и N (общее число особей всех S видов) лежат в основе простых показателей видового разнообразия:

- индекса видового богатства Маргалефа: $D_{Mg} = \frac{S-1}{\ln N}$;
- индекса видового богатства Менхиника: $D_{Mn} = \frac{S}{\sqrt{N}}$.

Например, 5 октября 1997 г. в Театральном парке г. Ростова-на-Дону в результате экскурсии была получена выборка, которая насчитывала 17 видов птиц, представленных 149 особями. Разнообразие будет составлять: по индексу Маргалефа – $D_{Mg} = 3{,}2$; по индексу Менхиника – $D_{Mn} = 1{,}4$. Достоинство этих индексов – легкость расчетов. Большая величина индекса соответствует большему разнообразию.

Индексы, основанные на относительном обилии видов. Эту группу индексов называют индексами неоднородности, так как они учитывают одновременно и выравненность, и видовое богатство. Индексы, основанные на относительном обилии видов, относятся к непараметрическим, поскольку не требуют никаких предположений о распределениях. Их применение углубляет оценки биоразнообразия, по сравнению с индексами видового богатства, которые опираются лишь на один параметр.

Выделяют две категории непараметрических индексов:

- индексы, полученные на основе теории информации (информационно-статистические);
- индексы доминирования.

Индекс Шеннона – Уивера. Р. Макартур [9] и Р. Маргалеф [10] впервые применили для оценки к исследованию видовой устойчивости и разнообразия сообщества теорию информации, которая основывается на изучении вероятности наступления цепи событий. Результат выражается в единицах неопределенности, или информации. К. Шеннон в 1949 г. вывел функцию, которая стала называться индексом разнообразия К. Шеннона. Расчеты индекса разнообразия Шеннона предполагают, что особи попадают в выборку случайно из «неопределенно большой» (т. е. практически бесконечной совокупности) генеральной совокупности, причем в выборке представлены все виды генеральной совокупности. Неопределенность будет максимальной, когда все события (N) будут иметь одинаковую вероятность наступления ($p_i = n_i/N$).

Она уменьшается по мере того, как частота некоторых событий возрастает по сравнению с другими, вплоть до достижения минимального значения (нуля), когда остается одно событие и есть уверенность в его наступлении.

Индекс Шеннона рассчитывается по формуле

$$H' = \Sigma\,(p_i \times ln\, p_i)\,,$$

где величина p_i – доля особей *i*-го вида в выборке.

В выборке истинное значение p_i неизвестно, но оценивается как n_i/N.

Причины ошибок в оценке разнообразия с использованием этого индекса заключаются в том, что в выборку невозможно включить все виды реального сообщества.

При расчете индекса Шеннона часто используется двоичный логарифм, но приемлемо также использовать и другие основания логарифма (десятичный, натуральный).

Индекс Шеннона (по основанию 2) обычно варьирует в пределах от 1,5 до 3,5, очень редко превышая 4,5.

Дисперсию индекса Шеннона (*VarH'*) рассчитывают по формуле

$$VarH' = \frac{\sum p_i \left(\ln p_i\right)^2 - \left(\sum p_i \ln p_i\right)^2}{N} + \frac{S-1}{2N^2}\,.$$

Если значения индекса Шеннона рассчитать для нескольких выборок, то полученное распределение величин подчиняется нормальному закону. Это свойство дает возможность применять мощную параметрическую статистику, включая дисперсионный анализ. Применение сравнительных параметрического и дисперсионного анализа полезно при оценке разнообразия различных местообитаний, когда есть повторности.

Для проверки значимости различий между выборочными совокупностями значений индекса Шеннона Дж. Хатчесон предложил использовать параметрический критерий Стьюдента:

$$t = \frac{H_1' - H_2'}{\left(VarH_1' - VarH_2'\right)^{1/2}}\,.$$

Число степеней свободы определяется по уравнению

$$df = \frac{\left(VarH_1' + VarH_2'\right)^2}{\left(VarH_1'\right)^2 / N_1 + \left(VarH_2'\right)^2 / N_2}\,,$$

где N_1 и N_2 – общее число видов в двух выборках.

На основе индекса Шеннона можно вычислить показатель выравненности *E* (отношение наблюдаемого разнообразия к максимальному):

$$E = \frac{H'}{\ln S}.$$

Величина E может изменяться от 0 до 1, причем $E = 1$ при равном обилии всех видов.

Индекс Шеннона оказался самым популярным в оценке данных по разнообразию и применяется чаще других.

Индекс Бриллуэна. Исследователи не всегда могут гарантировать случайный отбор объектов в выборочную совокупность или учесть все виды сообщества. Обычно это происходит из-за несовершенных методов отлова животных. Нельзя обеспечить случайность попадания объектов в выборку при отлове насекомых на свет (привлекаются виды, активные только ночью, и выпадают из списка видов формы с дневной активностью). Очень разнятся списки видов паукообразных, приносимых в гнезда большой синицей и собранных в биотопе традиционными методами, рекомендуемыми при сборе беспозвоночных. Подходящей формой информационно-статистического индекса в таких случаях может быть индекс Бриллуэна, определяемый по формуле

$$HB = \frac{\ln N! - \sum \ln n_i!}{N}.$$

Индекс Бриллуэна дает сходную с индексом Шеннона величину разнообразия, редко превышая 4,5. Однако при оценке одного и того же массива данных его величина ниже индекса Шеннона. Это объясняется тем, что в нем нет неопределенности, свойственной индексу Шеннона.

Выравненность определяется по формуле

$$E = \frac{HB}{HB_{\max}},$$

$$HB_{\max} = \frac{1}{N} \ln \frac{N!}{\{[N/S]!\}^{S-r} \cdot \{([N/S]+1)!\}^{r}},$$

где $[N/S]$ – целая часть отношения N/S, а $r = N - S\,[N/S]$.

Этим индексом мало пользуются, так как он трудно вычисляется и, если выборка мала, приводит к неверным выводам. Однако этот индекс рекомендуется использовать, если оценивается коллекция, а не случайная выборка, и если известен полный состав сообщества.

Меры доминирования. Основное внимание уделяют обилию самых обычных видов, а не видовому богатству. Лучшим среди индексов доминирования считается индекс Симпсона. Его иногда называют «индекс Юла», поскольку он напоминает меру, разработанную Юлом для оценки словарного запаса.

Индекс Симпсона описывает вероятность принадлежности любых двух особей, случайно отобранных из неопределенно большого сообщества, к разным видам формулой

$$D = a \times p_i^2,$$

где p_i – доля особей i-го вида.

Для расчета индекса используется формула, соответствующая конечному сообществу:

$$D = \sum \left(\frac{n_i (n_i - 1)}{N(N-1)} \right),$$

где n_i – число особей i-го вида; N – общее число особей.

По мере увеличения D разнообразие уменьшается. Поэтому индекс Симпсона часто используют в форме $(1 - D)$. Эта величина носит название «вероятность межвидовых встреч» и варьирует от 0 до 1. Индекс Симпсона очень чувствителен к присутствию в выборке наиболее обильных видов, но слабо зависит от видового богатства. Высокая или низкая величина индекса определяется типом распределения видовых обилий для случаев, когда число видов превышает 10.

Мера разнообразия Макинтоша. В 1967 г. Макинтош предложил рассматривать сообщество как точку в S-мерном гиперпространстве с координатами $(n_1, n_2, ..., n_s)$. Тогда евклидово расстояние такого сообщества от начала координат можно использовать как меру его разнообразия:

$$U = \sqrt{\sum n_i^2}.$$

Индекс Макинтоша U сам по себе не является индексом доминирования, однако, используя его, можно рассчитать меру разнообразия D, или доминирования, которая независима от объема выборки:

$$D = \frac{N - U}{N - \sqrt{N}}.$$

В дальнейшем можно рассчитать выравненность:

$$E = \frac{N - U}{N - N / \sqrt{S}}.$$

Индекс Бергера – Паркера – одна из мер доминирования. Его достоинство – простота вычисления. Этот индекс выражает относительную значимость наиболее обильного вида:

$$d = \frac{N_{\max}}{N},$$

где N_{max} – число особей самого обильного вида.

Увеличение величины индекса Бергера – Паркера, как и индекса Симпсона, означает уменьшение разнообразия и увеличение степени доминирования одного вида. Поэтому обычно используется величина, обратная индексу Бергера – Паркера, – $1/d$. Этот индекс независим от количества видов, но на него влияет объем выборки. Некоторые авторы считают этот индекс лучшей мерой разнообразия.

5.2.5. Анализ бета-разнообразия: сравнение, сходство, соответствие сообществ

Бета-разнообразие характеризует степень различий или сходства ряда местообитаний или выборок с точки зрения их видового состава, а иногда и обилия видов. Один из общих подходов к установлению бета-разнообразия – оценка изменений видового разнообразия вдоль средового градиента. Другой путь его определения – сравнение видового состава различных сообществ. Чем меньше общих видов в сообществах или в разных точках градиента, тем выше бета-разнообразие. Этот путь используется в любых исследованиях, рассматривающих степень различий видового состава выборок, местообитаний или сообществ. Вместе с мерами оценки внутреннего разнообразия местообитаний бета-разнообразие можно использовать, чтобы получить представление об общем разнообразии условий данной территории.

Выделено шесть мер измерения бета-разнообразия на основе данных по присутствию или отсутствию видов.

Мера Уиттекера описывается формулой

$$\beta_W = \frac{S}{\alpha} - 1,$$

где S – общее число видов, зарегистрированных в системе: a – среднее разнообразие выборок стандартного размера, измеряемое как видовое богатство.

Мера Коуди разработана для исследования изменений в сообществе птиц вдоль средового градиента:

$$\beta_C = \frac{g(H) + l(H)}{2},$$

где $g(H)$ – число видов, прибавившихся вдоль градиента местообитаний; $l(H)$ – число видов, утраченное на том же трансекте.

Меры Ратледжа. Мера β_R учитывает общее видовое богатство и степень совпадения видов:

$$\beta_R = \frac{S^2}{2r + S} - 1,$$

где S – общее число видов во всех выборках; r – число пар видов с перекрывающимся распределением.

Мера β_I основана на теории информации и была упрощена для качественных данных и равного размера выборок:

$$\beta_I^2 = \log(T) - (1/T)\sum e_i \log(e_i) - (1/T)\sum a_j \log(a_j),$$

где e_i – число выборок вдоль трансекта, в котором представлен i-й вид; a_j – видовое богатство j-й выборки; $T = \Sigma e_i = \Sigma a_j$.

Мера bE – экспоненциальная форма bI:

$$bE = \exp(bI) - l.$$

Мера Уилсона и Шмиды bT включает те же элементы утраты (l) и добавления (g) видов, что и мера Коуди, но стандартизована на среднее видовое богатство выборок a, входящее в меру Уиттекера:

$$bT = [g(H) + l(\mathrm{H})]/2a.$$

Самый простой способ измерения бета-разнообразия двух участков – расчет коэффициентов сходства или индексов общности. Списки видов могут быть представлены как конечные множества (или поля), элементами которых будут составляющие их виды.

Основным приемом упорядочивания данных для определения индексов общности по качественным признакам служит таблица 19, включающая четыре поля: сумма ($a + d$) называется числом совпадений качественных признаков, сумму ($b + c$) – числом несовпадений, a – числом положительных и d – числом отрицательных совпадений.

Все известные индексы общности распадаются на две группы в зависимости от того, учитывают они или игнорируют число отрицательных совпадений (d). Наибольшее значение в экологических работах имеют индексы, в формулы которых входит только число положительных совпадений. В таблице 20 приведены основные индексы общности.

Таблица 19

Определение индексов общности

a (число общих видов для двух списков)	b (число видов, имеющихся только во втором списке)	$a + b$ (общее число видов во втором списке)
c (число видов, имеющихся только в первом списке)	d (число видов, отсутствующих в обоих списках, но имеющихся в других, в которые входит всего S видов)	$c + d$ (число отсутствующих видов во втором списке)
$a + c$ (общее число видов в первом списке)	$b + i$ (число отсутствующих видов в первом списке)	$a + b + c + d = S$ (всего видов)

Таблица 20

**Основные индексы общности,
учитывающие положительные совпадения [5]**

Формула	Автор	Отношение
$I_B = \frac{a}{a+b}, b \geq c$	Ж. Браун-Бланке, 1932	*a* к числу видов в большем списке
$I_{SmS} = \frac{a}{a+c}, b \geq c$	В. Шимкевич,1926; Дж. Симпсон,1943	*a* к числу видов в меньшем списке
$I_{Cs} = \frac{2a}{(a+b)+(a+c)}$	А. Чекановский, 1900; И. Серенсен, 1948	*a* к среднему арифметическому числу видов в двух списках
$I_{K1} = \frac{a}{2}\left(\frac{1}{a+b}+\frac{1}{a+c}\right)$	С. Кульчинский, 1927	*a* к среднему гармоническому числу видов в двух списках
$I_{OB} = \frac{a}{\sqrt{(a+b)(a+c)}}$	Дж. Охайя,1957; Л. Баркман,1958	*a* к среднему геометрическому числу видов в двух списках
$I_J = \frac{a}{a+b+c}$	П. Жаккар,1901	*a* к числу видов в объединенном списке
$I_{SS} = \frac{a}{2(a+b+c)-a}$	Р. Сокал, П. Снит, 1963	*a* к сумме числа видов в объединенном списке и числу необщих видов
$I_{K2} = \frac{a}{b+c}$	С. Кульчинский, 1927	*a* к числу необщих видов

Предложено огромное число индексов общности, но чаще в биоценологических, фаунистических и биогеографических работах используются индексы Жаккара и Серенсена – Чекановского. Эти коэффициенты равны 1 в случае полного совпадения видов сообществ и равны 0, если выборки совершенно различны и не включают общих видов.

Индексы общности, учитывающие негативные совпадения, обычно используются при сравнении коллекций, когда известны полные видовые списки. Применение этой группы индексов в экологических и биогеографических исследованиях подвергалось серьезной критике. Ограниченное использование индексов, учитывающих отрицательные совпадения, связано с их большой зависимостью от редких видов, которые могут не попадать в выборки.

Объективные причины отсутствия были проанализированы Ю. А. Песенко [5]. Отсутствие вида в сборах может быть результатом неподходящих условий для его существования в местах сборов, т. е. вид не может здесь жить, его ниши нет в данной местности. Вследствие не-

которых исторических (географических) причин эволюция вида проходила в отдаленных от этих мест регионах, т. е. он не мог сюда попасть, хотя в данной местности и имелись подходящие для него условия. Вид может существовать в данной местности, но не попал в выборку из-за неадекватности методов сбора или из-за редкости вида. Отсутствие вида как результат первых двух причин несет ценную информацию о фауне и местообитании, но только при исключении третьей причины, что сделать, как правило, невозможно.

Наиболее распространенными индексами, учитывающими отрицательные совпадения, являются коэффициент простого совпадения, или индекс Сокала – Майченера:

$$I_{SM} = \frac{a+d}{a+b+c+d},$$

и индекс общности Барони – Урбани и Бюссера:

$$I_{BB1} = \frac{\sqrt{ad}+a}{\sqrt{ad}+a+b+c}, \quad 0 \le I_{BB1} \le 1.$$

Проблема оценки достоверности этих индексов не решена. Простота вычисления, являющаяся достоинством многих индексов, оборачивается недостатком – они не включают обилие видов. Это обстоятельство привело к тому, что чаще используются модифицированные индексы, включающие оценку обилий.

По мнению многих авторов [4; 5], наиболее приемлемо использование в экологических исследованиях коэффициента Серенсена:

$$C_N = \frac{2jN}{aN+bN},$$

где aN – общее число особей на участке А; bN – общее число особей на участке В; jN – сумма наименьших из двух обилий видов, встреченных на обоих участках. Так, если 12 особей вида были найдены на участке А и 29 особей того же вида на участке В, подсчитывая jN, следует взять величину 12.

5.2.6. Применение показателей разнообразия

Главные потенциальные области применения индексов разнообразия – охрана природы и мониторинг. В основе использования оценок разнообразия в этих областях лежат два положения:

- богатые видами сообщества устойчивее бедных видами;
- уровень загрязнения связан со снижением разнообразия и изменением характера видовых обилий.

При этом в охране природы обычно используются показатели видового богатства, а в экологическом мониторинге – индексы и модели видовых обилий.

В экологических исследованиях показатели разнообразия применяются в самых различных целях. Они с успехом были использованы в работах Р. Макартура и его последователей при изучении конкуренции у птиц, насыщенности и степени перекрывания их экологических ниш. Была выяснена зависимость разнообразия птиц от разнообразия некоторых элементов местообитания и других экологических факторов.

Д. Джейкобс в 1975 г. обобщил результаты многих исследований влияния экологических факторов на разнообразие сообществ и установил следующее:

1. Пространственная гетерогенность увеличивает разнообразие.
2. Температурная гетерогенность может уменьшать и увеличивать разнообразие в зависимости от суровости климата и других факторов.
3. Стрессовые условия среды обычно отрицательно связаны с разнообразием.
4. При повышении конкуренции в относительно небольшой период времени разнообразие может уменьшаться, но при ее наличии в течение периода, достаточного для протекания эволюционных преобразований (видообразование), разнообразие может увеличиваться.
5. Враги действуют как конкуренция, их эффект на разнообразие зависит от интенсивности и длительности их воздействия и от влияния врагов на конкуренцию среди жертв.
6. Влияние интенсивности потока энергии через сообщество и объем ресурсов питания могут быть очень важными, но степень и направление их влияния на разнообразие зависят от многих других факторов.

В период сукцессии могут протекать процессы разной направленности при изменении разнообразия.

Показатели разнообразия применяются в сравнении населения разных стадий, сезонной динамики сообществ, для экологической оценки различных видов, характера их распределения по разным местообитаниям, измерения степени пищевой специализации видов, измерения разнокачественности пищевого рациона вида. Показатели разнообразия также успешно применяются при оценке загрязнения водоемов и территорий, в частности при сравнении участков в градиенте загрязнения наземных экосистем.

5.2.7. Методы определения размеров популяций

В основе рассмотренных способов оценки разнообразия и сходства сообществ лежат количественные данные о численности живых организмов. Существуют специальные методы определения размеров популяций.

Так, метод изъятия удобен для оценки численности мелких организмов на определенном участке луга или в определенном объеме воды.

Специальной сеткой отлавливают животных, записывают число пойманных и не выпускают до конца исследования. Затем еще трижды повторяют отлов в том же месте, причем с каждым разом число пойманных животных будет уменьшаться. Полученные данные заносят в таблицу 21.

Таблица 21

Результаты учета пойманных животных

Проба	Число животных	Совокупный размер образца
1	120	0
2	93	120
3	60	213
4	35	273

При построении графика по оси *y* отмечают число пойманных при каждом отлове животных, по оси *x* – совокупный размер образца или общее число пойманных ранее животных. Продолжив линию графика к точке, в которой вновь пойманных животных не окажется (т. е. их число в последнем отлове равно нулю), можно оценить общий размер популяции.

Метод мечения и повторного отлова включает отлов животного и его мечение таким образом, чтобы не причинить животному вреда. Например, на жаберной крышке выловленной сетями рыбы прикрепляют алюминиевые пластинки или на ноги пойманных птиц надевают кольца. Мелких млекопитающих можно метить краской. Пойманных животных подсчитывают, метят репрезентативную выборку их них, после чего выпускают в том же самом месте. Через некоторое время животных снова отлавливают и в выборке подсчитывают число животных с меткой. Размер популяции оценивают, используя следующее выражение:

$$\text{общий размер популяции} = \frac{\text{число животных в первом улове} \times \text{число животных во втором улове}}{\text{число животных с меткой во втором улове}}.$$

Индекс вычисляют исходя из ряда допущений:

1. Внутри популяции организмы размещены случайным образом.
2. Между первым и вторым отловом должно пройти достаточно много времени.
3. Индекс применим только к популяциям, перемещение особей в которых ограничено географическим барьером.
4. Организмы равномерно распределены в пределах ареала.
5. Изменение размеров популяции, связанное с миграциями, рождением и гибелью особей, незначительно.
6. Метки не должны мешать передвижению животных и делать их заметными для хищников.

5.2.8. Модели генетического равновесия в популяции

В основе популяционной генетики, изучающей генотипы живых организмов без использования скрещиваний, лежит закон Харди – Вайнберга (его сформулировали независимо друг от друга двое ученых в 1908 г). Данный закон (положение, равновесие, уравнение) в полной мере выполняется лишь при определенных идеальных условиях.

Уравнение Харди – Вайнберга представляет собой математическую модель, объясняющую, каким образом в генофонде популяции сохраняется генетическое равновесие.

Формулировка закона Харди – Вайнберга. Частота генотипов по определенному гену в популяции остается постоянной в ряду поколений и соответствует уравнению $p^2 + 2pq + q^2 = 1$ (при условии наличия только двух аллелей данного гена), где p^2 – частота (доля от единицы) гомозигот по одному аллелю (например, доминантному – *AA*), q^2 – частота гомозигот по другому аллелю (*aa*), $2pq$ – частота гетерозигот (*Aa*), p – доля в популяции доминантного аллеля (*A*), q – частота рецессивного аллеля (*a*). При этом $p + q = 1$, или $A + a = 1$.

Может встречаться формулировка не по отношению к генотипам, а по отношению к аллелям: частоты доминантного и рецессивного аллелей в популяции будут оставаться постоянными в ряду поколений при соблюдении ряда условий. т. е. значения p и q не будут изменяться из поколения в поколение.

Таким образом, закон Харди – Вайнберга позволяет рассчитать частоты аллелей и генотипов в популяции, что является важной ее характеристикой, так как именно популяция рассматривается как единица эволюции.

Частоты генотипов рассчитываются исходя из частот аллелей и вероятности их объединения в одной зиготе. Для расчета частот генотипов применяется формула квадрата двучлена: $(p + q)^2 = p^2 + 2pq + q^2$.

Закон Харди – Вайнберга в полной мере выполняется при следующих условиях:

- популяция должна иметь большой размер;
- особи не должны выбирать брачного партнера в зависимости от генотипа по изучаемым генам, т. е. спаривание должно происходить случайным образом;
- миграция особей из популяции и в нее должна отсутствовать;
- в отношении изучаемого гена (его аллелей) не должен действовать естественный отбор, т. е. все генотипы должны быть одинаково плодовитыми;
- не должно возникать новых мутаций исследуемых генов.

Отклонение от уравнения Харди – Вайнберга говорит о том, что на популяцию действует какой-то фактор эволюции. Однако в больших популяциях отклонения бывают незначительными, если рассматривать

краткосрочный период времени, и это позволяет использовать закон для проведения расчетов. Но в эволюционном масштабе динамика генофонда популяции отражает то, как эволюция протекает на генетическом уровне.

Применение закона Харди – Вайнберга. В большинстве случаев частоту аллелей и генотипов вычисляют, взяв за основу частоту гомозиготных особей по рецессивному аллелю. Это единственный генотип, который распознается по фенотипическому выражению. Отличить доминантные гомозиготы от гетерозигот часто не представляется возможным, поэтому их вычисляют, пользуясь уравнением Харди – Вайнберга.

Рассмотрим пример использования закона Харди – Вайнберга. Допустим, в гипотетической популяции людей присутствуют только два аллеля цвета глаз – карий и голубой. Карий цвет определяется доминантным (А) аллелем гена, голубой – рецессивным (а). Пусть кареглазых людей будет 75 % (или в долях 0,75), а голубоглазых – 25 % (или 0,25). Требуется определить: 1) долю гетерозигот и доминантных гомозигот, 2) частоту аллелей в популяции.

Если доля рецессивных гомозигот составляет 0,25, то доля рецессивного аллеля находится как квадратный корень из этого числа (исходя из формулы $p^2 + 2pq + q^2 = 1$, где q^2 – частота рецессивных гомозигот, а q – частота рецессивного аллеля), т. е. будет 0,5 (или 50 %). Поскольку в гипотетической популяции людей только два аллеля, то сумма их долей составит единицу: $p + q = 1$. Отсюда находим долю доминантного аллеля: $p = 1 – 0,5 = 0,5$. Таким образом, частота обоих аллелей составляет по 50 %. Мы ответили на второй вопрос.

Частота гетерозигот составляет $2pq$. В данном случае $2 \times 0,5 \times 0,5 = 0,5$. Отсюда следует, что из 75 % кареглазых людей 50 % являются гетерозиготами. Тогда на долю доминантных гомозигот остается 25 %. Мы ответили на первый вопрос задачи.

Другой пример применения закона Харди – Вайнберга. Такое заболевание человека, как муковисцидоз, встречается только у рецессивных гомозигот. Частота заболевания составляет примерно 1 больной на 2500 человек. Это значит, что 4 человека из 10 000 являются гомозиготами, что составляет в долях единицы 0,0004. Таким образом, $q^2 = 0,0004$. Извлекая квадратный корень, находим частоту рецессивного аллеля: $q = 0,02$ (или 2 %). Частота доминантного аллеля будет равна $p = 1 – 0,02 = 0,98$. Частота гетерозигот: $2pq = 2 \times 0,98 \times 0,02 = 0,039$ (или 3,9 %). Значение частоты гетерозигот позволяет оценить количество патогенных генов, находящихся в скрытом состоянии.

Такие вычисления показывают, что, несмотря на малое число особей с гомозиготным рецессивным генотипом, частота рецессивного аллеля в популяциях достаточно велика за счет его нахождения в генотипах гетерозигот (носителей).

Если же закон Харди – Вайнберга не выполняется, то по отклонениям от расчетных величин можно установить эффект ограниченной численности, различие между самками и самцами при передаче аллелей потомкам, отсутствие свободного скрещивания, наличие мутаций, действие естественного отбора, наличие миграционных связей между популяциями.

Закон Харди – Вайнберга имеет важное прикладное значение.

В здравоохранении он позволяет оценить популяционный риск генетически обусловленных заболеваний, поскольку каждая популяция обладает собственным аллелофондом и, соответственно, разными частотами неблагоприятных аллелей. Зная частоты рождения детей с наследственными заболеваниями, можно рассчитать структуру аллелофонда. В то же время, зная частоты неблагоприятных аллелей, можно предсказать риск рождения больного ребенка.

Известно, что альбинизм – это аутосомно-рецессивное заболевание. Установлено, что в большинстве европейских популяций частота рождения детей-альбиносов составляет 1 на 20 тысяч новорожденных. Следовательно,

$$q^2(aa) = {}^1/_{20000} = 0{,}00005\,;$$

$$q(a) = \sqrt{0{,}00005} = 0{,}007\,;$$

$$p(A) = 1 - 0{,}007 = 0{,}993 \approx 1\,.$$

Поскольку для редких заболеваний $p(A) \approx 1$, то частоту гетерозиготных носителей можно рассчитать по формуле $2q$. В данной популяции частота гетерозиготных носителей аллеля альбинизма составляет $2q(Aa) = 2 \times 0{,}007 = 0{,}014$, или примерно каждый семидесятый член популяции.

Пусть в одной из популяций у 1 % населения выявлен рецессивный аллель, который не встречается в гомозиготном состоянии (можно предположить, что в гомозиготном состоянии этот аллель летален). Тогда $2q(Aa) = 0{,}01$, следовательно, $q(a) = 0{,}01/2 = 0{,}005$. Зная частоту рецессивного аллеля, можно установить частоту гибели зародышей-гомозигот: $q^2(aa) = 0{,}0052 = 0{,}000025$ (25 на миллион, или 1 на 40 тысяч).

В селекции закон Харди – Вайнберга позволяет выявить генетический потенциал исходного материала (природных популяций, а также сортов и пород народной селекции), поскольку разные сорта и породы характеризуются собственными аллелофондами, которые могут быть рассчитаны с помощью закона Харди – Вайнберга. Если в исходном материале выявлена высокая частота требуемого аллеля, то можно ожидать быстрого получения желаемого результата при отборе. Если же частота требуемого аллеля низка, то нужно или искать другой исходный

материал, или вводить требуемый аллель из других популяций (сортов и пород).

В экологии этот закон позволяет выявить влияние самых разнообразных факторов на популяции. Дело в том, что, оставаясь фенотипически однородной, популяция может существенно изменять свою генетическую структуру под воздействием ионизирующего излучения, электромагнитных полей и других неблагоприятных факторов. По отклонениям фактических частот генотипов от расчетных величин можно установить эффект действия экологических факторов. При этом нужно строго соблюдать принцип единственного различия. Пусть изучается влияние содержания тяжелых металлов в почве на генетическую структуру популяций определенного вида растений. Тогда должны сравниваться две популяции, обитающие в крайне сходных условиях. Единственное различие в условиях обитания должно заключаться в различном содержании определенного металла в почве.

Список литературы

1. *Алтухов, Ю. П.* Генетические процессы в популяциях / Ю. П. Алтухов. – М.: Академкнига, 2003. – 431 с.

2. География и мониторинг биоразнообразия / Н. В. Лебедева [и др.]. – М.: Изд-во науч. и учеб.-метод. центра, 2002. – 432 с.

3. *Денисова, С. И.* Полевая практика по экологии / С. И. Денисова. – Минск: Універсітэцкае, 1999. – 120 с.

4. *Мэгарран, Э.* Экологическое разнообразие и его измерение / Э. Мэгарран. – М.: Мир, 1992. – 181 с.

5. *Песенко, Ю. А.* Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях / Ю. А. Песенко. – М., 1982. – 287 с.

6. *Розенберг, Г. С.* Экология. Элементы теоретических конструкций современной экологии: учебное пособие / Г. С. Розенберг, Д. П. Мозговой, Д. Б. Гелашвили. – Самара: Самар. науч. центр РАН, 2000. – 396 с.

7. *Терещенко, В. Г.* Оценка различных индексов для выражения биологического разнообразия сообщества / В. Г. Терещенко, Л. И. Терещенко, М. М. Сметанин // Биоразнообразие. Степень таксономической изученности. – М.: Наука, 1994. – С. 86–98.

8. *Шитиков, В. К.* Оценка биоразнообразия: попытка формального обобщения / В. К. Шитиков, Г. С. Розенберг // Структурный анализ экологических систем. Количественные методы экологии и гидробиологии: сб. науч. тр., посвящ. памяти А. И. Баканова / отв. ред. чл.-кор. РАН Г. С. Розенберг. – Тольятти: СамНЦ РАН, 2005. – С. 91–129.

9. *Brody, S.* Bioenergetics and growth / S. Brody. – New York: Reinhold Publ. Corp., 1945. – 1023 p.

10. *MacArthur, R. H.* Fluctuations of animal populations, and measure of community stability / R. H. MacArthur // Ecology. – 1955. – V. 36, № 7. – P. 353–356.

11. *Margalef, R.* Information theory in ecology // Gen. Syst. – 1958. – № 3. – P. 36–71.

5.3. Моделирование процессов газообмена и фотосинтеза у растений

Благодаря уникальным свойствам хлорофилла, перешедшие на внешнюю орбиту в результате поглощения кванта света электроны не излучают энергию, а в процессе безизлучательных переходов переносят ее на другие химические соединения. Так начинается первая реакция в длинной цепи превращений неживого в живое. Важно вспомнить главные пути этих превращений и основные факторы, от которых они зависят. Тем самым надо связать воедино процессы, которые протекают в растениях и в среде их обитания. Рассмотрим сначала газообмен отдельно взятого листа, а затем перейдем к описанию динамики газообмена посева в целом.

5.3.1. Фотосинтез и газообмен листа

Исходным актом в цепи фотосинтетических процессов является поглощение света в хлоропластах, с одной стороны, и диффузия углекислого газа из окружающего лист пространства во внутренние полости листа – с другой. Поэтому анатомическое строение листа должно благоприятствовать этим процессам. Благодаря наличию устьиц осуществляется связь межклетника с окружающим лист воздухом, бесцветные клетки эпидермиса хорошо пропускают свет к хлоропластам, а внутренние воздушные полости обеспечивают вентиляцию – продуваемость листа, что способствует его интенсивному газообмену.

Под действием падающего света и в присутствии CO_2 процесс фотосинтеза в листе протекает в две стадии. В фотохимических (световых) реакциях свет превращается в химическую энергию: первые химически идентифицируемые продукты этих реакций – это аденозинтрифосфат (АТФ) и восстановленный никотинамиддинуклеотидфосфат (НАДФ-H_2). Биохимическая (темновая) стадия представляет, по существу, процесс, обратный распаду углеводов: в ней CO_2 с использованием энергии, запасенной в АТФ, восстанавливается до углеводов. Этот процесс называется карбоксилированием.

Факторы, лимитирующие фотосинтез. Все лимитирующие факторы можно разделить на две группы – внешние факторы, связанные с влиянием условий выращивания и внутренние, определяемые состоянием клетки. К первой группе относятся воздействия «быстрого реагирования» – свет, тепло, концентрация углекислого газа. Время реакции растений на эти воздействия составляет от долей секунды до нескольких минут. При этом «затягивание» реакций связано с такими побочными свойствами, как тепловая инерция листа или инерционность реакции устьиц.

Вторая группа факторов связана с состоянием самого фотосинтетического аппарата (ФА). К ней относится концентрация хлорофилла и, вообще, состояние и интенсивность развития хлоропластов, наличие необходимых ферментов и других соединений (АДФ, НАДФ, витамин К, цитохромы, рибулозодифосфат и др.).

Фотосинтетический аппарат клетки, разумеется, также создается за счет поступающих извне химических элементов и энергии, однако его нельзя мгновенно изменить. Он впитывает в себя историю формирования растений за предшествующий довольно продолжительный период, и для его трансформации при изменении внешних условий требуется также значительное время – от нескольких часов до нескольких суток. Кроме того, ФА отдельного листа находится под контролем генетических регуляторов – он формируется вместе с формированием листа, функционирует в течение определенного периода времени, а затем в процессе отмирания листа прекращает свою работу.

Моделирование газообмена листа. Представим две стадии фотосинтеза в виде двух обобщенных реакций: реакции карбоксилирования и реакции восстановления. Введем для этого следующие обозначения: C – концентрация CO_2 в клетке; Q_ϕ – интенсивность поглощенной листом ФАР; $П$ – синтезированный продукт; [А], [Н] и [ACO_2] – концентрации соответственно акцептора A, восстановителя H и карбоксилированного акцептора ACO_2.

Все величины относятся к единице площади листа. Предположим, что реакции подчиняются закону кинетики первого порядка. Тогда скорость первой реакции v_1 выражается формулой

$$v_1 = k_1[\text{A}]C ,$$

скорость второй –

$$v_2 = k_2[\text{H}][ACO_2] ,$$

где k_1 – константа скорости реакции карбоксилирования; k_2 – константа скорости реакции восстановления.

Пусть концентрация восстановителя, образующегося в световой фазе, пропорциональна поглощенной ФАР:

$$[\text{H}] = k_3 * Q_\phi ,$$

где k_3 – константа скорости реакции регенерации акцептора А.

Тогда интенсивность фотосинтеза

$$Ф = Q_\phi * C / aC + bQ_\phi ,$$

где $a = 1/ k_2 k_3 ([\text{A}]+[ACO_2])$, $b = 1/ k_1 ([\text{A}]+[ACO_2])$.

Приведенная формула свидетельствует об увеличении интенсивности фотосинтеза при росте концентрации CO_2 и поглощенной ФАР.

Ее недостатком является то, что это увеличение не ограничено. Чтобы устранить этот недостаток, воспользуемся следующей формулой:

$$\Phi = \frac{1}{\frac{1}{\Phi_{mm}} + \frac{1}{a_a Q_\phi} + \frac{r_{ac} + r_{sc}}{C_a}},$$

где Φ_{mm} – максимальная интенсивность фотосинтеза при насыщающих значениях концентрации CO_2 и ФАР; C_a – концентрация CO_2 не в листе, а в атмосфере; r_{ac} – сопротивление прилистного слоя воздуха; r_{sc} – сопротивление устьиц.

В последнем соотношении C_a означает концентрацию CO_2 не в листе, а в атмосфере. Поэтому в формулу включены дополнительные сопротивления прилистного слоя воздуха r_{ac} и устьиц r_{sc}.

Отметим, что «спусковой механизм» фотосинтеза не может начать свою работу при слишком низкой освещенности листа, т. е. при очень малой плотности светового потока. Для компенсации затрат на дыхание фотосинтетического аппарата требуется расход определенной энергии. Поэтому видимый фотосинтез (нетто-фотосинтез) представляет собой разность между истинным фотосинтезом и фотодыханием (интенсивность темнового дыхания обозначают R_d).

Рассмотрим теперь другой путь учета углекислотного лимитирования фотосинтеза (рисунок 36). Он связан с более детальным рассмотрением путей миграции CO_2 к реакционным центрам. Для вступления в реакцию карбоксилирования углекислый газ из окружающего лист пространства (C_a) должен первоначально проникнуть путем диффузии во внутреннюю полость листа (C_i), т. е. в межклетник – губчатый мезофилл.

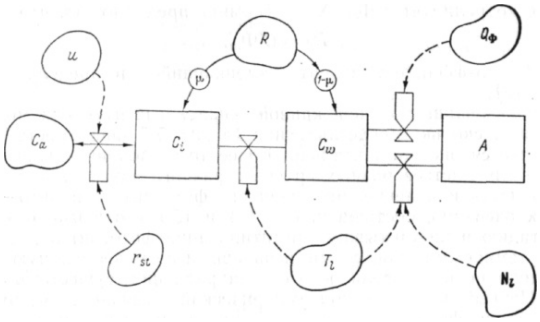


Рис. 36. **Потоковая диаграмма газообмена листа**

При этом на своем пути он встречает сопротивление прилистного слоя воздуха (u) и устьично-кутикулярное сопротивление (r_{st}). Устьичное сопротивление, как отмечалось выше, является одним из регули-

рующих факторов, определяющих связь фотосинтеза с радиационным и водным режимами.

Следующей ступенью поглощения CO_2 является его переход в жидкую фазу (C_w). Схематически такой переход можно описать с помощью диффузионного сопротивления внутри клеток – так называемого сопротивления мезофилла. После растворения CO_2 и его доставки к реакционным центрам происходят биохимические реакции, в результате которых образуются первичные ассимиляты А (продукт фотосинтеза).

На процесс газообмена «лист – воздух» влияет скорость ветра в посеве и устьичное сопротивление r_{st}. Во внутреннюю полость листа углекислый газ может поступать не только из атмосферы, но и за счет дыхания фитомассы R, что отмечено на диаграмме дополнительной стрелкой. На растворимость газа влияет температура T. Она же оказывает влияние на скорость биохимических реакций. Фотохимический процесс зависит от поглощенной ФАР. Наконец, на схеме показано лимитирование, связанное с возможным дефицитом азота N.

Для учета влияния CO_2, выделяющегося в процессе темнового дыхания, в соответствии с диаграммой часть потока μ направляется в межклетник, а другая часть $(1 - \mu)$ поступает к центрам карбоксилирования (в компартмент C_w). Поэтому детально следует рассмотреть только влияние температуры.

Температура является важным фактором, существенно изменяющим скорость фотосинтеза при одних и тех же значениях Q_ϕ и C_a. Интенсивность фотосинтеза, как и большинства других химических и биохимических реакций, увеличивается с повышением температуры.

Однако с ростом температуры возрастают и затраты на дыхание. Кроме того, при достаточно высоких температурах (40 °С и выше) ускоряется распад многих ферментов, в том числе и хлорофилла. Наиболее благоприятная температура для фотосинтеза многих растений находится в пределах 25–30 °С. С понижением температуры фотосинтез замедляется, а с наступлением заморозков вообще прекращается. При этом диапазон температур, в котором достигается оптимум фотосинтеза, смещается при уменьшении снабжения CO_2 и светом в сторону более низких значений, а сам оптимум становится более размытым.

Фотосинтез C_4-растений. Предыдущий анализ касался C_3-растений, к которым относится подавляющее большинство возделываемых в нашей стране культур. Фотосинтез растений тропического происхождения, таких, как кукуруза, сорго и другие, имеет ряд особенностей, которые позволили выделить их в специальную группу C_4-растений. Основным акцептором CO_2 у C_4-растений является фосфоенолпируват, а не рибулозодифосфат, как у C_3-растений. Связанный с помощью фермента фосфоенолпируваткарбоксилазы, CO_2 переносится к месту работы цикла Кальвина, где и освобождается, повышая

локальную концентрацию CO_2. Такая организация биохимического цикла позволяет повысить интенсивность процесса карбоксилирования, а также избежать ингибирования поглощения CO_2 кислородом. Процессы, происходящие на световой стадии у C_3- и C_4-видов, по-видимому, совпадают.

В полуэмпирических моделях, рассмотренных выше, различие C_3- и C_4-растений может быть учтено путем выбора соответствующих параметров.

5.3.2. Фотосинтез и газообмен посева

Выше мы рассмотрели совокупность процессов, протекающих в зеленом листе под действием падающего на него света. Эти процессы могут быть исследованы в лабораторных условиях на отдельном листе, помещенном в листовую камеру. Фотосинтез посева – явление более сложное.

Листья различных ярусов получают разные порции света, находятся в неодинаковых условиях углекислотного питания, по-разному обдуваются воздухом. Все это приводит к тому, что процесс фотосинтеза в каждый момент времени зависит, помимо внешних условий, от архитектоники посева, меняющейся, в свою очередь, в процессе онтогенеза.

Устьичное сопротивление, влияющее на скорость диффузии CO_2, зависит от поглощенной листом радиации и водного потенциала листа, а температура листа формируется в результате баланса радиационных и тепловых потоков с учетом расхода на транспирацию. Все это приводит к тому, что при построении модели газообмена листа надо «погрузить» локальную модель фотосинтеза в общую структуру, связывающую воедино аэродинамический, тепловой и водный режимы. И здесь мы должны перейти к компартментальной схеме.

Сформируем в посеве N L слоев толщиной h, перенумеровав их сверху вниз. Слой с номером j сверху и снизу граничит со слоями, имеющими соответственно номера j–1 и j+1. Листовой индекс j-го слоя обозначим через $L(j)$. Теперь следует вспомнить, что понятие компартмента имеет не только геометрический, но и функциональный смысл. В каждом слое помимо воздуха находятся фитоэлементы, которые характеризуются рядом параметров – биомассой, содержанием углеводов, белков и т. д. Нас в данный момент будут интересовать величины, связанные с газообменом. Поэтому необходимо ввести в рассмотрение такие переменные, как $C_a(j)$-концентрацию CO_2 в воздухе компартмента, $C_j(j)$-концентрацию CO_2 в межклетнике и т. д. Эти величины внутри компартмента должны считаться неизменными, а их изменение с высотой посева учитывается тем, что они варьируют при переходе от одного компартмента к другому.

Поток углекислого газа из j-го компартмента в j–1 можно выразить

$$j_{c(j-1)} = -\rho_a k_c \left(x_{j-\frac{1}{2}}\right) \frac{C_{a(j-1)} - C_{a(j)}}{h},$$

где ρ_a – плотность воздуха; $k_c \left(x_{j-\frac{1}{2}}\right)$ – константа скорости.

Количественное описание углекислотного обмена посева, как и для всех остальных веществ, основано на балансовых соотношениях.

5.3.3. Темновой метаболизм

Фотосинтез является лишь первым звеном в цепи биохимических реакций – процессом, дающим начало образованию разнообразных органических соединений, составляющих основу жизни растений. Однако ясно, что как для осуществления акта самого фотосинтеза, так и для реализации других функций растению необходимы вода и многие другие минеральные компоненты, которые оно получает из почвы. К главнейшим из них относятся азот, фосфор, калий, кальций, магний, сера и железо. Встречаясь в определенных пропорциях в клетках и тканях различных органов растения, они в процессе метаболизма образуют все вещества, необходимые растениям для осуществления жизненного цикла, – аминокислоты, белки, липиды, гормоны и витамины.

Трансформации всех соединений осуществляются в процессе обмена веществ – метаболизма, который, в отличие от фотосинтеза, происходящего на свету, принято называть темновым метаболизмом. Для нормального протекания обменных процессов и сопряженных с ними процессов роста и развития растений необходимо осуществить ряд основных элементарных актов, к которым следует отнести:

- поглощение вещества из окружающей среды;
- первичные реакции связывания некоторых веществ в местах поглощения;
- транспортировку исходных (поглощенных из почвы) веществ и промежуточных продуктов метаболизма к местам окончательного синтеза;
- откладывание ряда веществ «про запас» с возможным последующим использованием;
- распад метастабильных соединений, их транспортировка и реутилизация в других органах.

Совокупность всех этих процессов характерна для всех живых существ (растений, животных, микроорганизмов), однако в наземных растениях они имеют свою специфику. Доступность поступающих из почвы элементов питания постоянно поддерживается благодаря встречному движению – росту корней, осваивающих новые «территории»,

и перемещению воды с растворенными в ней минеральными солями по капиллярам почвы. Возможность поглощения все новых порций углекислого газа в больших количествах обеспечивается за счет турбулентного перемешивания воздуха и адвекции. Таким образом, растения, не обладая средствами передвижения, пропускают через себя потоки разнообразных веществ, отфильтровывая из них все необходимые для жизни компоненты.

Рассмотрим лежащие в основе метаболизма процессы более подробно. В процессе поглощения различных элементов корнями из почвы могут использоваться два механизма – пассивный транспорт (диффузия) и активный перенос. Их легко различить, поскольку диффузия направлена от мест с большей концентрацией вещества к местам, в которых концентрация данного вещества меньше.

Активный транспорт происходит с затратой энергии. Зависимость скорости поглощения вещества от его концентрации в источнике может быть выражена следующей формулой:

$$V_x = \alpha x / (1+\beta x) ,$$

где x – концентрация вещества в источнике; V_x – скорость; α и β – числовые коэффициенты. Коэффициент α равен тангенсу угла наклона кривой при малых концентрациях, $x \approx 0$, а отношение α/β характеризует максимальную скорость при насыщающей концентрации.

Пассивный перенос, происходящий под действием градиента электрохимического потенциала, связан с различием скоростей синтеза-распада в тех или иных органах растения. Так, очевидно, что в фазе генеративного роста основным потребителем всех субстратов является колос. Высокая метаболическая активность процессов биосинтеза в колосе приводит к тому, что весь наличный «строительный материал» сразу же потребляется. Следовательно, свежие ассимиляты и подвижные продукты промежуточных биохимических реакций или продукты распада будут эффективно транспортироваться в колос просто потому, что их концентрация в местах появления гораздо выше, чем в колосе.

Аналогичный механизм действует в процессе распределения ассимилятов между фотосинтезирующими органами и корнями. Однако в этот процесс может вмешиваться и активный транспорт. Так, например, при дефиците азота углеводы легко транспортируются в корни и вступают здесь в реакцию биосинтеза, которая приводит к росту корней – корни «ищут» азот. Однако не все 100 % азота потребляются корнями даже в условиях глубокого азотного голодания – определенная часть азота принудительно переносится в листья с тем, чтобы не допустить существенного ослабления фотосинтетических функций. Все эти и подобные им процессы происходят с затратой энергии.

Из подвижных соединений – углеводов, минеральных компонент, аминокислот – синтезируется структурная биомасса – различные белки (ферменты), составляющие фонд пластических веществ клетки, и высокомолекулярные углеводы (целлюлоза), образующие достаточно прочный «остов» растения. Кроме того, в растениях могут формироваться резервные (запасные) фонды. Резервы углеводов откладываются в виде крахмала, а резерв азота (в форме нитратов) сосредоточивается в основном в вакуолях. Существенно при этом отметить, что процесс образования резервных фондов протекает со скоростями, значительно превышающими возможные скорости извлечения этих фондов из резерва и включения их в метаболизм клетки.

Белки, являясь метастабильными соединениями, подвергаются распаду под влиянием тепловых воздействий, образуя аминокислоты, которые в дальнейшем могут либо вновь включаться в метаболизм, либо и далее подвергаться окислению в процессе дыхания. В клетке всегда присутствуют вещества, как синтезированные в ней самой, так и поступившие извне. При этом представляет интерес вопрос о взаимодействии экзогенных (поступивших из внешней среды) и эндогенных соединений. Оказывается, что углерод сахарозы, поступающей в клетку, часто является главным акцептором азота, который освобождается при распаде белка или поглощается клеткой из внешней среды. Именно таким образом формируется фонд аминокислот, предназначенный для построения белков. С другой стороны, углерод, освобождающийся в процессе распада белков, потребляется в основном в процессах дыхания.

Непрерывным процессом, сопровождающим все превращения веществ в клетке, а также активный транспорт и поглощение питательных веществ, является дыхание. В процессе аэробного дыхания происходит постоянное высвобождение энергии, запасенной в процессе синтеза, с поглощением кислорода, выделением воды и углекислого газа. В этом процессе, как и при фотосинтезе, участвуют многочисленные переносчики электронов (НАД, НАДФ, цитохромы) и АТФ-АДФ. Так, например, глюкоза $C_6H_{12}O_6$ в процессе расщепления претерпевает в клетке более 20 различных превращений, прежде чем превращается в углекислый газ и воду. При этом окисление одной молекулы глюкозы приводит к синтезу 38 молекул АТФ. Именно энергия АТФ как «универсального клеточного топлива» используется в дальнейшем во всех процессах метаболизма, требующих затрат энергии.

В процессе фотосинтеза запасается энергия, количество которой в 10–30 раз превышает «сиюминутные» потребности растений. Вся эта энергия используется на биосинтез, построение различных органелл клетки, рост и развитие растений и, в конце концов, на формирование урожая.

Достаточно полная модель, описывающая метаболизм растения, должна включать в себя следующие основные компоненты:

1) углекислый газ в атмосфере и в межклетнике;

2) метаболически активные минеральные вещества в почве и в растении;

3) пул метаболически активных аминокислот;

4) резервный пул углеводов (крахмал);

5) резервные пулы нитратов и аминокислот;

6) белки;

7) клетчатка (целлюлозная оболочка клеток и остов стебля).

Энергетические затраты растения в процессе метаболизма складываются из следующих основных статей:

1) фотодыхание;

2) активное поглощение минеральных веществ из почвы;

3) восстановление нитратов;

4) синтез аминокислот;

5) транспорт аминокислот и углеводов;

6) синтез элементов структурной биомассы.

При построении моделей многие из перечисленных выше пулов и компонент дыхания объединяются. Пул аминокислот как промежуточный продукт биохимических реакций часто не рассматривается. В простых полуэмпирических моделях вообще вводится два обобщенных пула – фонд «свежих» ассимилятов – продуктов фотосинтеза и фонд старых ассимилятов – продуктов распада. Дыхание представляется состоящим из двух компонент – дыхания поддержания структуры и дыхания роста.

5.3.4. Рост и развитие растений

Все существующие модели с точки зрения детальности воспроизведения в них процессов метаболизма можно разделить на два класса.

В первый попадают такие структуры, в которых процессы минерального питания не учитываются. Предполагается, что уровни всех элементов минерального питания находятся в относительном оптимуме и не лимитируют продукционный процесс в течение всего онтогенеза. Поскольку в данном случае скорость накопления биомассы и величину урожая лимитирует фотосинтез, в задачу исследования входит анализ и воспроизведение всех факторов, оказывающих влияние на интенсивность протекания этого процесса. Единственный субстрат, фигурирующий в моделях этого класса, – углерод и его производные, а вся динамика ростовых процессов строится на описании ассимиляции углекислого газа и его дальнейшем использовании для построения различных органов растения. Это допущение можно оправдать тем, что углерод состав-

ляет свыше 90 % сухой биомассы растений. Поскольку в модели описан лишь один поток – поток CO_2 из атмосферы, данные конструкции следует отнести к классу однопоточных.

Другой класс составляют так называемые двухпоточные модели. В них, помимо потока углекислого газа, учитывается также и поток минеральных веществ (в основном азота) из почвы. Все описание динамики метаболизма, роста и развития строится при этом на рассмотрении взаимодействия двух потоков и учете адаптивных реакций растений на стрессовые воздействия, связанные с недостатком того или иного фактора.

Рассмотрим однопоточную модель, в которой скорость прироста биомассы определяется интенсивностью работы фотосинтетического аппарата.

Анализ формул, определяющих скорость фотосинтеза, показывает, что основными влияющими на продуктивность факторами в данных условиях являются интенсивность приходящей радиации (в том числе ФАР) и температура воздуха. Бесспорно, косвенное влияние на урожай могут оказать и другие факторы, например, влажность воздуха. Действительно, даже в условиях оптимального увлажнения почвы скорость транспирации зависит от влажности воздуха. Следовательно, изменчивость влажности воздуха приводит к вариациям затрат тепла на транспирацию и температуры листьев. Мы, однако, будем считать, что эти вариации малы, а вероятность значительных отклонений от среднего близка к нулю. Это, в частности, означает, что для рассматриваемой климатической зоны такие опасные явления, как, например, суховеи или ливневые осадки, нехарактерны. Будем также предполагать, что в рассматриваемой зоне отсутствует сильная ветровая нагрузка, приводящая к полеганию растений.

Описанная ситуация представляется несколько идеализированной. Однако именно с нее и нужно начинать изучение закономерностей формирования урожая. В литературе эти условия названы комфортными. Любые отклонения от них следует относить к стрессовым воздействиям.

Общий прирост биомассы (ΔW) в однопоточной модели за один временной шаг определяется как разность нетто-фотосинтеза и темнового дыхания:

$$\Delta W = \Phi_{\Pi} - R \ ,$$

где Φ_{Π} – суммарный фотосинтез посева; R – темновое дыхание.

Для описания достаточно медленных процессов роста и развития растений можно ограничиться временным шагом, равным суткам. Все величины должны быть измерены в одних и тех же единицах, например, в граммах углерода, приходящихся на квадратный сантиметр посева.

Приросшая биомасса в комфортных условиях распределяется между отдельными органами растения по определенной характерной для данной культуры и сорта генетической программе.

Биологическое время характеризует возраст растения или его стадию развития в соответствии с той или иной шкалой. Введем условные обозначения для органов растения: $i = 1$ – листья, $i = 2$ – корни, $i = 3$ – стебель, $i = 4$ – генеративные органы. Тогда прирост фитомассы отдельного органа ΔW_i можно определить по следующей формуле:

$$\Delta W_i = a_i(\tau_b)\Delta W,$$

где a_i – ростовая функция; τ_b – биологическое время; ΔW – прирост биомассы.

В период генеративного роста правую часть предыдущей формулы следует дополнить слагаемым, учитывающим отток старых ассимилятов в генеративный орган:

$$\Delta W_i = a_i(\tau_b)\Delta W + b_i(\tau_b)W,$$

где a_i – ростовая функция; b_i – обменная функция, определяющая долю всей фитомассы, перемещаемой в i-й орган в течение суток. При $b > 0$ осуществляется приток старых ассимилятов в i-й орган, а при $b < 0$ – отток; τ_b – биологическое время; W – суммарная биомассы.

Поскольку зависимость интенсивности фотосинтеза от влияющих на нее факторов нам известна, остается установить соответствующие зависимости для дыхания R, ростовых и обменных функций.

Интенсивность дыхания связана с процессами поглощения, восстановления, транспорта и биосинтеза. Суммарное дыхание R можно разделить на две составляющие – дыхание роста R_g и дыхание поддержания структуры R_m:

$$R = R_g + R_m.$$

Дыхание роста определяется суммарными затратами энергии на совокупность всех процессов, связанных с созданием новой структурной биомассы. В соответствии с этим определением можно считать его пропорциональным суточной сумме фотосинтеза:

$$R_g = k_g \cdot \Phi_П,$$

где k_g – безразмерный коэффициент; $\Phi_П$ – продуктивность фотосинтеза.

Дыхание поддержания структуры имеет под собой следующую основу. Белки и другие соединения, образующие структурную биомассу, самопроизвольно разлагаются. Отнесенная к единице биомассы скорость разложения увеличивается с ростом температуры. Поэтому даже при отсутствии роста растение нуждается в постоянном подводе энергии, которая затрачивается на регенерацию белков. Если этот подвод

энергии прекращается, происходит расстройство всех регуляторных функций, распад образующих клетку структур и тканей растения и оно, в конце концов, погибает. Именно эта часть затрат энергии в общем балансе и получила название дыхания поддержания структуры. Интенсивность дыхания различных органов, вообще говоря, различна. Это связано с различием по органам растения концентрации белка, находящегося в активной форме.

$$R_m = k_m \cdot B \,,$$

где k_m – безразмерный коэффициент, B – количество белка.

Перейдем к рассмотрению понятия биологического времени. Во многих моделях биологическое время измеряется в относительных единицах: $\tau_b = 0$ соответствует всходам, $\tau_b = 1$ – цветению, $\tau_b = 2$ – полной зрелости. Такая шкала удобна, поскольку момент цветения делит весь вегетационный период приблизительно пополам. Однако трудно, по-видимому, при такой шкале связать астрономическое время с модельным. В отечественной литературе более распространенным является другой показатель развития – сумма эффективных температур. Этот показатель и возьмем за основу. Известно, что для прохождения каждого межфазного периода (всходы – начало кущения, кущение, стеблевание и т. д.) растения должны накопить определенную сумму эффективных температур. Кроме того, переход на генеративный путь развития связан с определенным для каждого вида растений типом фотопериодизма.

Рассмотрим первоначально влияние температуры. Повышение температуры в определенных пределах приводит к ускорению развития. Поэтому в качестве приращения биологического времени за каждые сутки можно принять:

$$\Delta\tau(j) = (Ta(j) - Tn) \cdot sign(Ta(j) - Tn) \,,$$

где функция $sign(Ta(j) - Tn)$ означает: 1 при $(Ta(j) - Tn) \geq 0$, 0 при $(Ta(j) - Tn) < 0$.

Биологическое время измеряется по шкале Цельсия. Поскольку для прохождения каждого межфазного периода растению необходимо «набрать» свою сумму температур, надо ввести другие пороги, уже по суммам температур. Эти пороги должны характеризовать смену фаз развития. Обозначим их через $T_{\Sigma(k)}$, где k – номер межфазного периода, и будем их называть порогами биологического времени.

Начало отсчета сумм эффективных температур связывается с моментом появления всходов, так что в момент всходов $\tau_b = 0$. Для расчета биологического времени в период «всходы – цветение» надо считать k равным 1:

$$\tau_b(l) = \sum_{j=1}^{l} (Ta(j) - Tn(1)) \cdot sign(Ta(j) - Tn(1)),$$

где l – номер дня с момента всходов.

Суммирование продолжается до тех пор, пока биологическое время не достигнет первого порога, т. е. суммы температур, необходимой для наступления следующей фенофазы.

Далее перейдем к описанию ростовых функций. Предложено распределение ассимилятов по органам рассчитывать в два этапа. На первом из них вычисляется соотношение прироста «корешки – вершки», т. е. выделяются части биомассы, идущей на построение корневой системы и всех надземных органов растения. На втором этапе надземная часть прироста биомассы распределяется между листьями, стеблями и генеративными органами. Этот подход вполне оправдан, поскольку позволяет в дальнейшем относительно просто ввести влияние стрессовых воздействий.

Ростовая функция листьев имеет вид (рисунок 37 а)

$$a_1(\tau_b) = 1\text{-}x_l^{al},$$

где $x_l = \tau_b / S_{Rl}$, $a_l = a_l + \beta_l x_l + \gamma_l x_l^2$; S_{Rl} – биологическое время конца роста листьев; a_l, β_l, γ_l – коэффициенты.

Для ростовых функций корня принято соотношение (рисунок 37 б)

$$a_2(\tau_b) = b_r(1 - x_r^{a^r}),$$

где b_r – начальная доля ассимилянтов, направляемых в корень; $x_r = \tau_b / S_{Rl}$, $a_r = a_r + \beta_r x_r + \gamma_r x_r^2$; S_{Rl} – биологическое время начала цветения; a_l, β_l, γ_l – числовые коэффициенты.

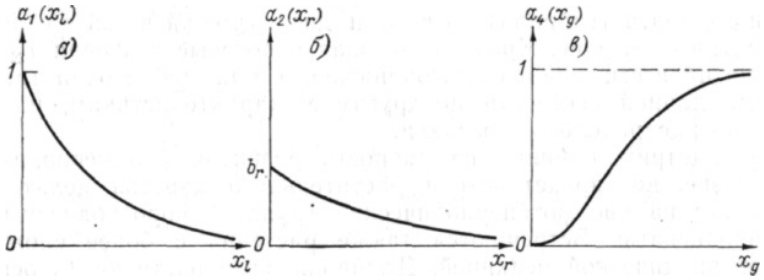


Рис. 37. **Ростовые функции листьев (а), корня (б) и колоса (в)**

Ростовая функция колоса вычисляется по формуле (рисунок 37 в)

$$a_4(\tau_b) = x_g^{a_g},$$

$$x_g = (\tau_b - S_{0g}) / (S_{kg} - S_{og}),$$

$$a_g = a_g + \beta_g x_g + \gamma_g x_g^2,$$

где S_{0g} и S_{kg} – биологическое время начала и конца роста колоса; a_g, β_g, γ_g – числовые коэффициенты.

Наконец, для ростовой функции стебля используется выражение

$$a_3(\tau_b) = 1 - a_1(\tau_b) - a_2(\tau_b) - a_4(\tau_b).$$

Неизвестные коэффициенты модели находятся в результате решения задачи идентификации. Под параметрической идентификацией обычно понимается процесс определения параметров моделей на основе измерения переменных в ходе предварительных экспериментов.

Таким образом, выведенные выше соотношения позволяют рассчитывать продукционный процесс различных культур в комфортных условиях и определять зависимость урожая от складывающихся в сезоне погодных условий.

Имея набор реализаций погодных условий за ряд лет вегетации, можно организовать компьютерный эксперимент и проанализировать зависимость потенциальной продуктивности агроэкосистемы от режима облачности, температурного и ветрового режимов.

Список литературы

1. *Бихеле, З. Н.* Математическое моделирование транспирации и фотосинтеза растений при недостатке почвенной влаги / З. Н. Бихеле, Х. А. Молдау, Ю. К. Росс. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 223 с.

2. *Зилитинкевич, С. С.* Проникающая турбулентная конвекция / С. С. Зилитинкевич. – Таллин: Валгус, 1989. – 207 с.

3. *Калер, В. Л.* Онтогенетическая адаптация фотосинтеза растений как следствие количественных изменений основных элементов фотосинтетического аппарата. Теоретическое рассмотрение / В. Л. Калер, Л. Е. Фридлянд // Физиология растений. – 1978. – Т. 25. – С. 664–669.

4. *Калер В. Л.* Моделирование адаптации фотосинтетического аппарата растительной клетки к изменяющимся условиям внешней среды / В. Л. Калер, Л. Е. Фридлянд // Теоретические основы и количественные методы программирования урожаев. – Л., 1979. – С. 24–38 (Тр. АФИ).

5. *Лайск, А.* Кинетика фотосинтеза и фотодыхания Cs-растений / А. Лайск. – М.: Наука, 1977. – 196 с.

6. Моделирование продуктивности аэроэкосистем / Н. Ф. Бондаренко [и др.]. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 262 с.

7. *Полуэктов, Р. А.* Динамические модели экологических систем / Р. А. Полуэктов, Ю. А. Пых, И. А. Швытов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 288 с.

8. *Полуэктов, Р. А.* Динамические модели агроэкосистемы: монография / Р. А. Полуэктов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 311 с.

9. *Пых, Ю. А.* Математические модели фотосинтеза листа в общей модели продуктивности агроэкосистем / А. Ю. Пых // Сборник трудов по агрономической физике. – 1976. – Вып. 38. – С. 30–46.

10. *Пых, Ю. А.* Подмодель фотосинтеза и фотодыхания Cs-растений / А. Ю. Пых // Теоретические основы и количественные методы программирования урожаев. – Л., 1979. – С. 39–45 (Тр. АФИ).

11. *Сиротенко, О. Д.* Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем / О. Д. Сиротенко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1981. – 167 с.

12. *Allen, L.* Photosynthesis in plant canopies: eifect of light responce curves and radiation source geometry / L. Allen, D. W. Stewart, E. R. Lemon // Photo-synthetica. – 1974. – Vol. 8, № 3. – P. 184–207.

13. *Bjorkman, O.* Comparative studies on photosynthesis in higher plants. Photophysiology / O. Bjorkman. – 1973. – Vol. 8. – P. 2–61.

14. *Gaastra, P.* Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance / P. Gaastra // Meded. Landb. Hogesch. Wageningen. – 1959. – Vol. 59, № 13. – P. 1–68.

15. *Hall, A. E.* A model of leaf photosynthesis and respiration / A. E. Hall // Carn. Inst. Wash. Year Book. – 1971. – Vol. 70, № 1. – P. 530–540.

16. *Hall, A. E.* Model of leaf photosynthesis and respiration / A. E. Hall, O. Bjorkman // Ecol. Study. – 1975. – Vol. 12, № 1. – P. 55–72.

17. *Keulen, H., van* Simulation of water use and herbage growth in arid' regions / H. van Keulen. – Wageningen: Pudoc, 1975. – 184 p.

18. *Laar, H. H., van* C02 assimilation, light responce curves of leaves, some experimental data / H. H. van Laar, F. W. T. Ponning de Vries // Vevsl. Inst. biol. scheik. Onderz, LandbGewossen. Wageningen. – 1972.

19. *Monsi, M.* Ober den Lichtfaktor in der Pflanzengesellschaf-ten und seine Bedeutung fur din Stoffproduktion / M. Monsi, T. Saeki // Jap. J. Bot. – 1953. – Vol. 14, № 1. – P. 22–52.

20. *Penning de Vries F. W. T.* Simulation of plant growth and crop production / F. W. T. Penning de Vries, H. H. van Laar (eds.). – Wageningen: Pudoc, 1982. – 308 p.

21. QA model for simulation photosynthesis in plant communities / W. G. Duncan [etc]. – Hilgardia, 1967. – Vol. 38, № 4. – P. 181–205.

22. Simulation of assimilation, respiration and transpiration of crops / C. T. Wit (et al). – Wageningen: Pudoc, 1978. – 141 p.

5.4. Моделирование распространения возбудителей болезней и вредителей

5.4.1. Оценка потерь биологического урожая

Оценка потерь урожая от вредителей и болезней – необходимый элемент любой системы управления, в основе которой лежат эконо-

мические критерии. Получить такую оценку очень трудно, поскольку принимаемые меры обычно носят профилактический (превентивный) характер. В этом случае определить точные экономические последствия практически невозможно. Часто успеха в борьбе с болезнями и вредителями добиваются без точного понимания особенностей системы и механизма ее действия, иногда даже не зная конкретного возбудителя болезни или вредителя и его биологии.

Оценка потерь биологического урожая является объектом эмпирического моделирования. В течение периода вегетации проводят наблюдения за ростом здоровых и больных растений, идентифицируют фенологические фазы, проводят количественную (чаще в процентах) оценку заболевания в различных фазах роста растения. Чтобы связать зависимую переменную Y (потери урожая в процентах) с независимыми переменными X_i (тяжесть заболевания в стадии i развития растения), обычно пользуются уравнением регрессии.

Пример 1. Потери урожая пшеницы от листовой ржавчины можно оценить по следующей зависимости:

$$Y = 5{,}3788 + 5{,}5260\, X_1 + 0{,}3308\, X_2 + 0{,}5019\, X_3 ,$$

где X_1, X_2, X_3 – степень тяжести поражения болезнью в фазах выхода в трубку, молочной и молочно-восковой спелости. Это уравнение «объясняет» около 80 % разброса экспериментальных данных. Аналогичные исследования проводились для оценки потерь картофеля от фитофтороза и по другим культурам от различных заболеваний.

Подобные уравнения регрессии иногда называют «многоточечной моделью». Это связано с тем, что с его помощью можно анализировать течение болезни в нескольких «точках» периода вегетации сельскохозяйственной культуры. Если возникает необходимость в краткосрочном анализе, то обычно применяют так называемую «модель критической точки», с помощью которой можно оценить влияние болезни на физиологию развивающегося растения в стационарной и критической фазах роста.

Пример 2. Потери урожая риса от пирикуляриоза составляют

$$Y = 0{,}57\, X ,$$

где X – процент пораженных гнилью узлов метелки через 30 дней после ее выбрасывания.

Пример 3. Потери от стеблевой ржавчины пшеницы составляют

$$Y = -25{,}33 + lnX ,$$

где X – тяжесть заболевания, когда зерновка достигает ¾ своего окончательного размера.

Названные модели относят к классу линейных, их решением служат площади, ограниченные кривой развития болезни.

Разработка моделей, оценивающих влияние болезней и вредителей на параметры исследуемого растения, позволит напрямую прогнозировать урожай с учетом соответствующих потерь, а также понять механизм воздействия болезней и вредителей на физиологические процессы в самом растении.

5.4.2. Прогнозирование развития болезней

Болезнь на растении будет развиваться, если благоприятны условия, создаваемые растением-хозяином и внешней средой, если присутствует инокулят. Компоненты микроклимата зависят главным образом от погоды, надежно прогнозировать которую можно только на очень короткий период времени. Поэтому обычно задачу прогнозирования ставят в тех случаях, когда ясно, что благоприятные для развития болезни биологические и метеорологические условия уже сложились. И соответствующие меры по борьбе с заболеванием принимают только тогда, когда есть уверенность, что они оправданы.

Обычно в моделях не учитывают количество инокулята, присутствующего в данной фазе развития растений. При этом предполагают, что имеющегося инокулята достаточно для начала эпифитотии, проводят наблюдения за погодой, микроклиматом, прогнозируют развитие болезни на основе этих наблюдений.

Пример. Прогноз возникновения фитофтороза картофеля. Условия полагают благоприятными для развития фитофтороза, если:

- средняя температура за 5 суток $\leq 25{,}5\ ^{o}C$;
- общее количество осадков за 10 суток ≥ 30 мм;
- минимальная температура в эти сутки $\geq 7{,}2\ ^{o}C$.

Если было зарегистрировано 10 последовательных суток, каждые из которых соответствовали указанным условиям, то через 7–14 суток после завершения этой десятидневки прогнозируют возникновение фитофтороза. Одновременно рекомендуют принятие мер по борьбе с заболеванием. Однако для разных климатических условий (соотношение между осадками, относительной влажностью воздуха и температурой) могут потребоваться альтернативные прогнозирующие системы.

Для прогнозирования листовой и стеблевой ржавчины пшеницы были построены уравнения множественной регрессии. Чтобы получить оценку будущей скорости развития болезни, авторы этих моделей использовали около 15 метеорологических и биологических параметров.

5.4.3. Математическая модель развития болезни

Такие болезни, как фитофтороз картофеля или ржавчина зерновых, в начальной стадии поражения распространяются экспоненциально (по типу «сложных процентов»). Этот процесс отличается от процесса на-

копления денег тем, что прирост добавляется к запасу непрерывно по мере образования, тогда как проценты с денежного капитала добавляются к нему обычно через определенные промежутки времени, чаще через год или месяц.

Уравнение имеет следующий вид:

$$X = X_0 \cdot e^{rt},$$

где X – количество инфекции, накопившееся за время t; X_0 – исходное количество болезни; r – скорость нарастания инфекции; e – основание натурального логарифма (≈ 2,72).

Теоретическое обоснование для использования этого уравнения применительно к эпифитотиям вполне оправдано. Предположим, что патоген – гриб. Он образует новые споры, которые разносятся и прорастают где-либо, образуя дочерние поражения. Если гриб из 1000 родительских поражений образует N дочерних, а из 2000 родительских поражений образует 2N дочерних, т. е. если в любых условиях число дочерних поражений пропорционально числу родительских поражений, то данное уравнение может быть использовано.

Скорость распространения инфекции сохраняется не всегда. Поражение увеличивается логарифмически, если инфекции независимы и не сталкиваются друг с другом. По мере увеличения зараженности поражения могут перекрывать друг друга или конкурировать из-за пространства. Когда это случится, число дочерних поражений уже не будет оставаться пропорциональным числу родительских поражений и логарифмическое распространение болезни прекратится.

Количество инфекции при увеличении с 1 % до 2 % остается малым. Но если количество инфекции велико, оно не может распространяться так же быстро, поскольку большинство спор, выделяемых родительскими поражениями, попадает на уже зараженные ткани и пропадает без всякой пользы для патогена.

5.4.4. Модели «хищник – жертва»

Основной целью моделирования в системах «растение – вредитель» и «животное – хищник или паразит» является организация контроля за размерами популяций вредных организмов с тем, чтобы экономический ущерб от их распространения не превышал заданного предела.

При описании простых динамических систем «хищник – жертва» обычно принимаются следующие допущения:

- популяция вида может быть представлена одной переменной, возраст и пол не учитываются;
- эффекты мгновенны и нет интервалов между, например, яйцекладкой и зрелостью или заглатыванием пищи и превращением в нового хищника;

• при отсутствии хищников число жертв растет согласно логистическому уравнению роста;

• скорость поедания жертв пропорциональна произведению размеров популяций жертв и хищников;

• показатель смертности приписан только хищникам, для которых жертвы являются источником пищи.

Возможны следующие модификации уравнений «хищник – жертва»:

1. Автономный рост хищников, т. е. возможность для хищников использования другого способа пропитания, кроме поедания данного вида жертв.

2. Ограниченное поедание жертв хищниками. Без этого ограничения потребление жертв в пересчете на одного хищника возрастает линейно с ростом числа жертв, что не соответствует действительности.

3. Наличие укрытия для жертв: в некоторых естественных средах ограниченные группы жертв могут находить укрытия, где обеспечивается их безопасность от хищников.

4. Учет «эффекта запаздывания». Эта особенность в жизни проявляется при попытке выправить занос автомобиля, что может привести к увеличению заноса; при стремлении стабилизировать экономические системы, приводящее к обратному результату; при попытке отрегулировать температуру воды в душе, когда не удается зафиксировать оптимальное положение крана и человек рискует замерзнуть или обжечься. Примерами запаздывания в биологии являются эволюционные явления. Если рост носит экспоненциальный характер, то

$$\frac{dN}{dt} = N_0 \cdot e^{\mu(t)},$$

где μ – относительный темп роста; N – численность особей в популяции; e – основание натурального логарифма ($\approx 2{,}72$); t – время,

Таким образом, скорость прироста численности популяции зависит от начальной численности, относительного темпа роста и времени t. Однако если между рождением и формированием взрослой особи проходит время τ, то правильнее учесть это в модели:

$$\frac{dN}{dt} = N_0 \cdot e^{\mu(t+\tau)}.$$

Иногда целесообразно учитывать запаздывающие действия окружающей среды. Темп роста может зависеть от управляющих переменных $E(t)$, действие которых на организм может проявляться с запаздыванием. Тогда в модели значение относительного темпа роста нужно определять из величины переменной среды $E(t)$ с учетом задержки реакции на время τ.

Попытки математического описания динамики численности отдельных биологических популяций и сообществ имеют солидную историю. Одна из первых моделей динамики роста популяций принадлежит английскому экономисту и священнику Т. Р. Мальтусу (1766–1834). В своем труде «Опыт о законе народонаселения» он утверждал, что в человеческом обществе, как и во всей живой природе, существует абсолютный закон безграничного размножения особей. При этом рост населения Земли идет в геометрической прогрессии, в то время как средства существования увеличиваются лишь в арифметической. Т. Р. Мальтус, абсолютизируя роль биологических факторов в воспроизводстве населения, рисует жестокие последствия открытого им закона народонаселения: «Человек, появившийся на свет, уже занятый другими людьми, если он не получил от родителей средств к существованию, на которые он вправе рассчитывать, если общество не нуждается в его труде, не имеет никакого права требовать для себя какого-нибудь пропитания, ибо он совершенно лишний на этом свете. На великом пиршестве природы для него нет прибора. Природа приказывает ему удалиться, и если он не может прибегнуть к состраданию кого-либо из пирующих, она сама принимает меры к тому, чтобы ее приказание было приведено в исполнение» [11]. Врачебную деятельность Т. Р. Мальтус считал противоестественной, так как она сохраняет жизнь «лишним людям».

Первым успехом математической экологии стала модель «хищник – жертва», предложенная итальянским математиком В. Вольтерра (1860–1940) в книге «Математическая теория борьбы за существование» (1931 г.). Чтобы проанализировать «взаимоотношения» между хищником и жертвой в соответствии с моделью В. Вольтерры, можно представить гипотетический двухмерный океан, разделенный на одинаковые квадраты взаимно перпендикулярными прямыми. Океан населяют только два вида рыб – безобидные скумбрии и пожирающие их акулы. При этом в каждом месте пересечения прямых (узле) может в данный момент времени находиться либо одна из этих рыб, либо вообще ничего. Теперь опишем поведение животных, которыми мы заселили океан.

Так, скумбрии и акулы могут плавать, перемещаясь за единицу времени из того узла, в котором они находятся, в один из соседних. При этом скумбрия перемещается с равной вероятностью в любой из незанятых соседних узлов. Акула же сначала определяет, находится ли рядом скумбрия, и если это так, то плывет именно к тому узлу и поедает ее. Если рядом с акулой скумбрии отсутствуют, то она с равной вероятностью переплывает в любой из соседних узлов.

Акулы и скумбрии «взрослеют», и их возраст увеличивается на единицу, когда истекает один тактовый интервал жизни океана. При достижении определенного возраста (*Tc* – для скумбрии и *Ta* – для аку-

лы) каждая акула начинает через равные промежутки производить по одному детенышу. Родившийся детеныш сначала размещается в любом из узлов, соседних с матерью, а потом на него распространяются те же законы, что и на остальных.

Если акула в течение некоторого количества последовательных тактовых интервалов ни разу не поймала скумбрию, она погибает от голода. Скумбрия в нашем океане может погибнуть только в пасти акулы, потому что она питается планктоном, который всегда в избытке.

Океан имеет конечные размеры и прямоугольную форму, а животные, оказавшиеся вблизи его берегов, никогда не выбрасываются на берег, а те, которые в отчаянии все-таки хотят это сделать, оказываются сразу на противоположной стороне океана.

Таким образом, условия жизни обитателей океана заданы. Затем случайным образом разбросаем акул и скумбрий по океану и перенумеруем их, установим возраст каждому животному, для каждой акулы определим момент, когда она умрет с голоду, если не съест скумбрию. Все это, конечно, можно сделать с помощью компьютера, который и будет следить за жизнью океана.

Начинается первый такт жизни океана. Пусть сначала на один шажок переместится первая скумбрия и, если подошел срок, размножится, затем вторая, третья, а после начнут свою одноактовую охоту акулы. В конце такта подведем итог, исключив акул, умерших от голода, и скумбрий, съеденных акулами, а также прибавив родившихся животных. После этого можно начинать следующий такт и т. д. В результате мы (т. е. компьютер) сможем проследить, как изменяются со временем численности акул и скумбрий в океане.

Вопросы о корректности модели возникают почти всегда, когда пытаются моделировать сложные процессы в природе и обществе. С одной стороны, всякое моделирование невозможно без упрощения процесса, без пренебрежения второстепенными деталями. С другой – есть риск «переупростить» модель, отбросив важные черты явления, ведь довольно трудно понять, какая черта процесса второстепенная, а какая нет, пока он не изучен. Поэтому задача исследователя – найти золотую середину, создать модель процесса, не лишая его первостепенных черт. И здесь нельзя дать никаких «верных» рекомендаций – приходится надеяться только на опыт и интуицию.

Математическая модель Лотки – Вольтерры применима для описания различных процессов в биологии, экологии, медицине, в социальных исследованиях, в истории, в радиофизике и других науках. Эта модель, как отмечает Д. И. Трубецков, представляет собой математическую модель дарвинского принципа борьбы за существование [9], на создание которого Ч. Дарвина [5] натолкнула книга «Опыт о законе народонаселения» Т. Р. Мальтуса. В ней указывается на необ-

ходимость гибели некоторого числа людей от голода, болезней, войн и других факторов ради общего баланса существования. Причем погибают самые слабые, бедные, больные члены общества. Если вмешаться в этот природный процесс и, например, дать милостыню нищим, то численность людей будет увеличиваться при все более острой нехватке пищи.

Дарвин распространил идеи Т. Р. Мальтуса на все живое: в природе идет борьба за жизнь, в которой худший и слабеющий организм погибает первым, а побеждают более развитые формы, более здоровые и приспособленные. Именно эти особи дают потомство. Организмы быстрее адаптируются к условиям среды, если обострения такой борьбы повторяются через некоторые промежутки времени.

Модель Лотки – Вольтерры описывает взаимодействие двух видов – популяции хищников и популяции жертв.

Пусть $N(t)$ – численность жертв, $P(t)$ – численность хищников в момент времени t. Тогда модель Лотки – Вольтерры имеет вид

$$\frac{dN}{dt} = aN - bNP\ ,$$
$$\frac{dP}{dt} = -dP + cNP\ ,$$

где a, b, c, d – положительные постоянные.

Приведенная система уравнений основана на следующих допущениях:

• при отсутствии хищников жертвы размножаются неограниченно согласно уравнению $dN/dt = aN$, которое иногда называют уравнением Мальтуса;

• хищники при отсутствии жертв вымирают согласно уравнению

$$dP/dt = -dP\ ;$$

• слагаемые, пропорциональные произведению NP, рассматриваются как превращение энергии одного источника в энергию другого (эффект влияния популяции хищников на популяцию жертв, т. е. результат их встречи, состоит в уменьшении скорости прироста dN/dt численности жертв на величину NP, пропорциональную численности хищников).

Приведем еще несколько усложненных моделей «хищник – жертва».

Система «хищник – жертва» с учетом внутривидовой конкуренции:

$$\frac{dN}{dt} = \mathrm{a}N * \left(1 - \frac{N}{K_1}\right) - bNP\,,$$
$$\frac{dP}{dt} = -dP * \left(1 - \frac{N}{K_2}\right) + cNP\,,$$

где $K_{1,2}$ – потенциальные емкости экологических систем, которые определяются доступным количеством ресурсов и соответствуют предельным значениям численности популяций.

Модель конкуренции:

$$\frac{dN_1}{dt} = r_1 N_1 \left(1 - \frac{N_1}{K_1}\right) - eN_1N_2 \ ,$$

$$\frac{dN_2}{dt} = r_2 N_2 \left(1 - \frac{N_2}{K_2}\right) - hN_1N_2 \ .$$

Здесь r_1, r_2, e, h – положительные постоянные.

Модель мутуализма (симбиоза):

$$\frac{du_1}{dt} = u_1(r_1 + a_{11}u_1 + a_{12}u_2) \ ,$$

$$\frac{du_2}{dt} = u_2(r_2 + a_{21}u_1 + a_{22}u_2) \ .$$

Для описания мутуализма важно, чтобы $a_{12} > 0$ и $a_{21} > 0$.

Обобщенную модель Лотки – Вольтерры можно описать следующей системой уравнений:

$$\frac{du}{dt} = A(u) - B(u,v) \ ,$$

$$\frac{dv}{dt} = -D(v) + C(u,v) \ ,$$

где u и v – численности жертв и хищников соответственно; $A(u)$ – функция размножения жертв при отсутствии хищников; $D(v)$ – функция вымирания хищников при отсутствии жертв; функция $B(u,v)$ описывает поедание хищниками жертв; $C(u,v)$ – эффективность потребления жертв хищниками. Возможны дополнительные факторы внутри- и межпопуляционных отношений [3]:

• нелинейная зависимость скорости размножения популяций жертв от плотности при малых значениях плотности (отсутствие достаточного количества брачных пар): $A(u) = au^2/(N + u)$, где a и N – положительные постоянные;

• внутривидовая конкуренция жертв: $A(u) = au(1 - u/K)$;

• насыщение хищников: $B_1(u) = bu/(1 + \alpha u)$ – трофическая функция хищника;

• нелинейный характер поедания хищниками жертв: $B_1(u) = bu2/(1 + \alpha u)$;

• конкуренция хищников за жертв: $B_2(v) = bv/(1 + \beta v)$. При этом $B(u,v) = B_1(u)B_2(v)$;

• конкуренция хищников за отличные от жертв ресурсы: $C(v) = v/(1 + v/K_1)$;

• нелинейный характер зависимости скорости размножения хищника от плотности популяции при малых значениях плотности: $C_2(v) = cv/(N_v + v)$, при этом $C(u,v) = C_1(u)C_2(v)$ и $C_1(u) = B_1(u)$, $D_2(v) = cv$, т. е. $C(u,v) = cv/(N_v + v)\, B_1(u)$.

Использование системы уравнений, где каждое учитывает характеристики самого объекта и взаимное влияние двух компонентов системы, в качестве математической модели правомерно в самых разных ситуациях: при прогнозировании взаимодействия загрязнения с окружающей средой (природа выступает в качестве жертвы, а загрязнение – хищника), при построении модели очистки сточных вод (загрязнитель в качестве «жертвы», а биологически активный ил – «хищника»), модели классовой борьбы (рабочие в качестве «жертвы», а капиталисты – «хищника»), в модели общества эпохи охотников-собирателей (пищевые ресурсы в качестве «жертвы», а человек – «хищника»), в модели распространения инфекционного заболевания (человек в качестве «жертвы», а возбудитель заболевания – «хищника»).

5.4.5. Биологический метод борьбы с нежелательным видом

Речь идет о теоретическом обосновании метода Кюрасао. Сущность этого метода заключается в том, что в популяцию, которую хотят подавить (например, в популяцию сельскохозяйственных вредителей), регулярно вводят стерильных транс-самцов. Таких самцов с большим числом транслокаций можно получить, например, подвергнув облучению нормальных самцов. Не оставляя нормального потомства, т. е. не участвуя в процессе естественного воспроизводства, эти самцы, будучи вполне жизнеспособными, наряду с нормальными участвуют во внутривидовой борьбе, в том числе за самок, снижая тем самым скорость естественного увеличения популяции.

Рассмотрим модель, предложенную А. Д. Базыкиным [1].

Пусть $x(t)$ – плотность нормальных самцов на поле; n^* – постоянная скорость, с которой стерильные самцы вводятся в популяцию (т. е. число стерильных особей, вводимых в единицу времени на единицу площади поля); $y(t)$ – плотность стерильных самцов.

Необходимо определить скорость n^* для постепенного снижения до нуля численности нормальных самцов, т. е. достаточную, чтобы $x(t) \to 0$.

Можно составить уравнения изменения численности нормальных и стерильных самцов:

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = rx - \delta x^2 - \delta xy \\ \dfrac{dy}{dt} = n^* - \delta y^2 - \delta xy \end{cases},$$

где $r = b - d$ – это постоянная скорость естественного увеличения нормальных самцов; δx^2 – снижение скорости роста численности из-за конкуренции между нормальными самцами; δy^2 – снижение скорости роста численности из-за конкуренции между стерильными самцами; δxy – снижение скорости роста численности из-за конкуренции между нормальными и стерильными самцами.

Решение этой системы уравнений показало, что $x(t) \to 0$, если $n^* \geq r^2 / \delta xy$.

Задача. Сколько стерильных самцов необходимо вводить в популяцию нормальных насекомых за единицу времени на единицу площади, чтобы $x(t) \to 0$, если r = 1 1/час, а δxy = 0,01 1/час?

Для решения достаточно подставить эти значения в предыдущую формулу.

5.4.6. Модель эпидемии

За многие тысячелетия существования человечества огромное число людей погибло от различных эпидемий. Чтобы бороться с эпидемиями, т. е. своевременно применять те или иные медицинские мероприятия (карантины, вакцинации и т. д.), необходимо уметь сравнивать эффективность этих мероприятий. Сравнить же их можно лишь в том случае, если есть возможность предсказать, как при том или ином мероприятии будет меняться ход эпидемии, прежде всего число больных. Отсюда возникает необходимость в построении моделей, которые могли бы служить целям прогноза.

Сначала рассмотрим модель «естественного» хода эпидемии (без медицинского вмешательства). Понятно, что модель эпидемии может включать в себя влияние факторов самых различных уровней. Так, можно было бы учесть законы, управляющие деятельностью бактериальных клеток, степень восприимчивости к инфекции отдельных людей, вероятности встречи носителей инфекции с еще здоровыми людьми и многие другие факторы. Так как нашей целью является лишь создание иллюстративной модели, то мы абстрагируемся от многих факторов.

Пусть имеется N здоровых людей, и в момент времени $t = 0$ в эту группу попадает один заболевший человек (источник инфекции). Предположим, что никакого удаления заболевших из группы не происходит (нет ни выздоровления, ни гибели, ни изоляции). Будем считать также,

что человек становится источником инфекции сразу же после того, как он сам заразится.

Обозначим число заболевших в момент времени t через $x(t)$, а число здоровых – через $y(t)$ (очевидно, что $x(t)+y(t) = N+1$ в любой момент времени).

При $t = 0$ выполняется условие $x(0) = 1$.

Рассмотрим интервал времени $t + dt$, где dt – малый промежуток времени. Необходимо определить, сколько новых больных появится за этот промежуток времени. Можно предположить, что их число будет пропорционально величине dt, а также числу встреч здоровых и заболевших людей, т. е. произведению величин $x \cdot y$:

$$dx = \alpha \cdot x \cdot y \cdot dt,$$

где α – коэффициент пропорциональности (коэффициент передачи инфекции).

$$y = N + 1 - x \qquad \rightarrow \qquad \frac{dx}{dt} = \alpha x\left[N+1-x\right].$$

Решение этого уравнения:

$$x(t) = \frac{N+1}{Ne^{-\alpha(N+1)t}+1}.$$

Прогноз – форма зависимости числа больных в группе от времени – представлен на рисунке 38.

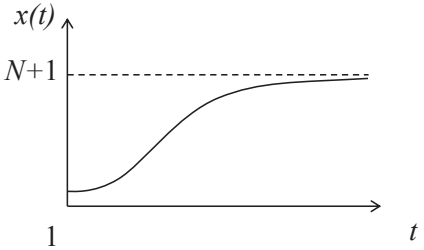


Рис. 38. **Изменение числа больных со временем**

Задача. Оценить количество больных через шесть суток и сколько людей заболеет за шестой день, если $\alpha = 0{,}001$, а $N + 1 = 1101$ чел.?

Для получения ответов следует использовать решение уравнения.

Можно усложнить модель, предположив, например, что в момент времени t болен не один человек, а несколько (b). Кроме того, предположим, что через небольшой промежуток времени больной выздоравливает и получает иммунитет. Тогда $z(t)$ – это число переболевших и выздоровевших к моменту t.

$$x + y + z = N + b,$$

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = \alpha xy - \gamma x \\ \dfrac{dy}{dt} = -\alpha xy \end{cases},$$

где γx – число выздоровевших.

Тогда прогноз числа заболевших будет иметь форму, представленную на рисунке 39.

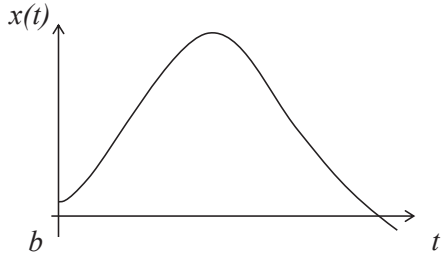


Рис. 39. **Изменение числа больных со временем при условии формирования иммунитета**

Конкретный вид кривой зависит от N, b, α, γ.

В модели можно учесть смертность от болезни, передачу болезни через переносчика (грызуны) и т. д.

Список литературы

1. *Базыкин, А. Д.* Нелинейная динамика взаимодействующих популяций / А. Д. Базыкин. – М.; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2003. – 368 с.

2. *Богданов, К. Ю.* Хищник и жертва / К. Ю. Богданов // Квант. – 1993. – № 3/4.

3. *Братусь, А. С.* Динамические системы и модели биологии / А. С. Братусь, А. С. Новожилов, А. П. Платонов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 400 с.

4. *Вольтерра, В.* Математическая теория борьбы за существование: пер. с фр. / В. Вольтерра. – М.: Наука: Главн. ред. физ.-мат. лит-ры, 1976. – 288 с.

5. *Дарвин, Ч.* Воспоминания о развитии моего ума и характера (автобиография) / Ч. Дарвин. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – 265 с.

6. *Джефферс, Дж.* Введение в системный анализ: применение в экологии / Дж. Джефферс; пер. с англ. Д. О. Логофета; под ред. и с предисл. Ю. М. Свирежева. – М.: Мир, 1981. – 256 с.

7. *Мамеева В. Е.* Системный анализ и основы моделирования экосистем: учебно-методическое пособие к лабораторно-практическим работам для студентов, обучающихся по специальности 110102 «Агроэкология» / В. Е. Мамеева. – Брянск: Изд-во Брян. ГСХА, 2011. – 132 с.

8. *Смиряев, А. В.* Моделирование: от биологии до экономики: учебное пособие для студентов специальности «Селекция и генетика сельскохозяйственных культур» / А. В. Смиряев, А. В. Исачкин, Л. К. Харрасова. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 122 с.

9. *Трубецков, Д. И.* Феномен математической модели Лотки – Вольтерры и сходных с ней. Методические заметки / Д. И. Трубецков // Саратовские известия вузов «ПНД». – 2011. – Т. 19, № 2. – С. 69–88.

10. *Франс, Дж.* Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Торнли. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

11. *Malthus, T. R.* An assay on the principle of population, as it affects the future improvement of society [Electronic resource]. – 1798. – Mode of access: http://www.faculty.rsu.edu/felwell/Theorists/Malthus/essay2.htm.

5.5. Описание времени и климата в экологических моделях

5.5.1. Модель роста живой системы, учитывающая влияние окружающей среды

Продуктивность сельскохозяйственных экосистем является результатом комбинации генетических характеристик биологических объектов и условий окружающей среды, среди которых важнейшая роль принадлежит погоде. Климат определяет типы культур, выращиваемых в данном регионе, а фактическая погода в течение сезона – урожайность этих культур. Важно количественно определить зависимость между погодой и продуктивностью. Это необходимо для прогнозирования и управления производством.

Многие модели роста живых систем или отдельных аспектов продуктивности животных и растений можно представить в виде

$$\frac{dW}{dt} = g(W, P, E_m, E_w),$$

где W – масса; t – время; P – множество параметров или постоянных, характеризующих организм; E_m – величины, характеризующие условия окружающей среды, которые поддаются управлению (от *management* – управление); E_w – показатели, описывающие погоду и не зависящие от экспериментатора (от *weather* – погода).

Функция g – это некоторое аналитическое выражение, связывающее между собой все характеристики.

Адекватность модели может быть оценена путем сопоставления прогнозируемых и фактических данных. Иногда работа с фактическими данными о температуре и осадках в силу их труднодоступности или нетипичности может оказаться нецелесообразной. Тогда в уравнениях

лучше использовать параметры, которые дают приблизительное описание среднемноголетних данных о погоде в исследуемом районе.

5.5.2. Описание времени в моделях

Наиболее удобной единицей измерения времени при описании роста и развития растений и животных являются сутки или их десятичные доли.

Пусть t – переменная времени, тогда можно выразить целую часть через t_i , а дробную – через t_d .

Можно выразить доли суток в часах, минутах, секундах, например: t = 16,243 суток, тогда t_i = 16, а t_d = 0,243. Перейти от дробной части суток к часам, минутам и секундам можно по следующим формулам:

• часы = целая часть от 24 * t_d

часы = целая часть от (24 * 0,243) = целая часть от 5,832 = 5;

• минуты = целая часть от 60 * 24 * t_d – 60 * часы

минуты = целая часть от (60 * 24 * 0,243 – 60 * 5) = целая часть от (349,92 – 300) = целая часть от 49,92 = 49;

• секунды = целая часть от 60 * 60 * 24 * t_d – 60 * 60 * часы – 60 * * минуты

секунды = целая часть от (60 * 60 * 24 * 0,243 – 60 * 60 * 5 – 60 * * 49) = целая часть от (20995,2 – 18000 – 2940) = целая часть от 55,2 = 55.

Обратный перевод времени (5 часов 49 минут 55 секунд) в доли суток: t_d = 1 / 24 * (часы + мин / 60 + сек / 3600) = 1 / 24 × (5 + 49 / 60 + 55 / / 3600) = 0,208 + 0,034 + 0,00064 = 0,243.

5.5.3. Преобразование календаря в моделях

Определенную сложность при учете времени в процессе моделирования представляет високосный год. Поэтому для удобства принимают начало года 1 марта, а конец – всегда 28 февраля.

Пусть N – порядковый номер климатологических суток $1 \le N \le 365$, D – сутки месяца от 1 до 31, M – порядковый номер месяца по обычному календарю от 1 до 12.

Переход от даты к порядковому номеру суток по юлианскому календарю: если M меньше 1, то $M := M + 12$; если M больше 13, то $M := M - 12$.

Знак «: =» читается «назначаем величину».

Порядковый номер суток N определяется как целая часть выражения (30,6*M + D – 91,3).

Пример 1. Найдем порядковый номер суток 15 мая, считая от 1 марта:

$$N = 30{,}6*5 + 15 - 91{,}3 = 153 + (-76{,}3) = 76{,}7 .$$

Получаются 76-е сутки от 1 марта.

Для выполнения обратного перехода от порядкового номера суток к дате используют следующие формулы:

M – целая часть от (N + 91,3)/ 30,6.

D – целая часть от N – 30,6*M + 91,3.

Пример 2. Найдем число и месяц, которым соответствуют 100-е сутки:

M – целая часть от (100 + 91,3)/ 30,6 = 6,25.

D – целая часть от 100 – 30,6*6 + 91,3 = 7,7.

Получается 7 июня.

5.5.4. Уравнение времени

Истинное местное солнечное время – это время, которое показывают солнечные часы в данной местности. Оно отличается от среднего солнечного времени на величину, которая колеблется на протяжении года. Численно эта разница определяется уравнением времени. В нем учитывается, что орбита Земли не круговая, а эллиптическая, а также наклон эклиптики (угол между плоскостью экватора и плоскостью земной орбиты).

Поправка, задаваемая уравнением времени, определяется по следующей эмпирической формуле:

$$-0{,}00198 - 7{,}12965*\cos y - 1{,}84002*\sin y - 0{,}68841*\cos 2y + 9{,}92209*\sin 2y + 0{,}30260*\cos 3y + 0{,}10635*\sin 3y + 0{,}03508*\cos 4y - - 0{,}21211*\sin 4y - 0{,}00895*\cos 5y - 0{,}00773*\sin 5y + 0{,}00061*\cos 6y ,$$

где y – годовой угол, определяемый из соотношения $y = (N - 21)/365*360^{o}$.

Размерность результата – минуты или доли минуты.

Поправка достигает наибольших значений в феврале (–14 минут) и ноябре (+16 минут), а 15 апреля, 14 июня, 1 сентября и 25 декабря равно нулю. Чаще всего в сельскохозяйственных моделях нет смысла так точно учитывать время. Исключением будут исследования, где значительную роль играет долгота светового дня.

5.5.5. Изменение долготы дня

Для определения долготы дня с порядковым номером N (g_N) можно использовать следующую формулу:

$$g_N = \frac{2cos^{-1}(-tg\varphi * tg\delta)}{360} ,$$

где φ – широта местности; δ – солнечное склонение, т. е. угол, задаваемый в градусах, между линией, соединяющей Солнце и Землю, и плоскостью экватора. Угол δ зависит только от времени года и соответственно принимает значения $\delta = 0^{o}$ в дни равноденствий ($y = 0^{o}$, y = 180^{o}), δ = = +23,45° 21 июня ($y = 90^{o}$), δ = –23,45° 21 декабря ($y = 270^{o}$).

В данном случае долгота дня вычисляется исходя из предположения, что угол зенита (угловое расстояние между направлением на солнце и местной вертикалью) составляет 90°, когда центр солнечного диска расположен на линии горизонта. Более точно моменты восхода и захода определяются по касанию верхней частью солнечного диска линии горизонта, причем это должен фиксировать наблюдатель, находящийся на уровне моря.

Для точного определения начала и конца сумерек обычно используют угол 6 градусов, на который опускается за горизонт центр солнечного диска. «Морские сумерки» определяются углом 12 градусов, а астрономические – углом 18 градусов.

В биологии часто на продолжительность конкретного светового дня гораздо сильнее влияют конкретные погодные условия.

5.5.6. Изменение потока фотосинтетически активной радиации

Количество фотосинтетически активной радиации (ФАР) в сутки (МДж/м^2) в течение года изменяется и зависит от долготы дня и угла зенита (угловое расстояние между направлением на солнце и местной вертикалью).

Пусть I_N – среднее многолетнее значение ФАР, падающей на горизонтальную поверхность за сутки с порядковым номером N. Для описания сезонных изменений I_N надо знать количество ФАР в данной местности 21 июня (I_{113}) и 21 декабря (I_{296}).

$$\bar{I}_N = (\bar{I}_{113} + \bar{I}_{296}) + (\bar{I}_{113} - \bar{I}_{296}) \times \sin\left(\frac{(N-21)}{365}/360\right).$$

В разные фазы развития растениям требуется разное количество ФАР. Сначала можно рассчитать, какое количество ФАР поступило до заданного момента времени и какое усвоилось растением (% усвоения ФАР). Затем пересчитать на 1 га в зависимости от густоты стояния растений. Таким образом, зная количество ФАР, необходимое для прохождения определенной фазы развития, мы можем предсказать время наступления следующей фазы.

При моделировании распространения солнечной радиации важно учитывать облачность. В зависимости от интенсивности облачности можно вводить коэффициент-поправку.

5.5.7. Описание температуры в моделях

Годовые изменения температуры воздуха и почвы в районах с умеренным климатом можно описать синусоидой (рисунок 40).

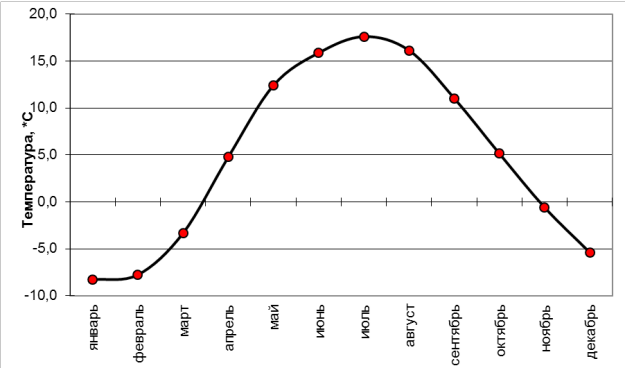


Рис. 40. **Средние многолетние данные температуры воздуха в г. Горки**

Среднюю температуру в сутки N можно определить по формуле

$$T_N = a + b \times sin\,(((N - N_0)/365)/360),$$

где a – среднегодовая температура; b – амплитуда изменения температуры; N_0 – фаза аппроксимирующей синусоиды (смещение максимума синусоиды от начала координат); N – порядковый номер суток от 1 марта.

5.5.8. Описание осадков в моделях

Осадки – это один из главных факторов, определяющих урожайность (рисунок 41). Лишь для немногих сельскохозяйственных культур (плодовые или растения в защищенном грунте) влияние количества осадков может быть незначительно.

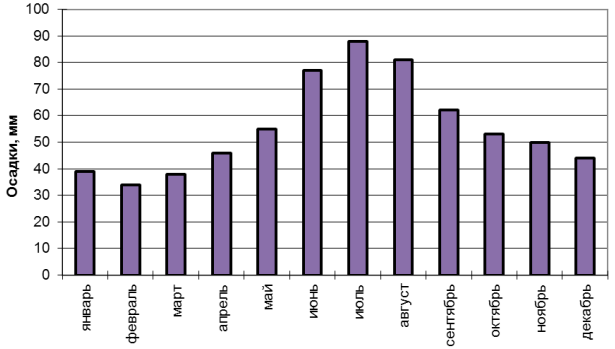


Рис. 41. **Средние многолетние данные количества осадков в г. Горки**

При моделировании количества осадков, чтобы исключить влияние неодинаковой продолжительности календарных месяцев, отсчет времени ведется в сутках.

Среднее количество осадков, выпадающих в сутки N, можно определить по формуле

$$R_N = a + b \times sin\,(((N - N_0)/365)/360)\,,$$

где a – среднегодовое количество осадков; b – амплитуда изменения осадков; N_0 – фаза аппроксимирующей синусоиды (смещение максимума синусоиды от начала координат); N – порядковый номер суток от 1 марта.

Изменчивость количества осадков – важная характеристика при изучении проблем ирригации и водопотребления. Коэффициент вариации осадков в течение месяца составляет 0,6 и сохраняет относительное постоянство в течение всего календарного года. Согласно метеорологическим данным, приблизительно 1/3 всех дней каждого месяца можно считать дождливыми. Для более точного моделирования применяется вероятностная оценка (p = вероятность отсутствия осадков, q = вероятность выпадения определенного количества осадков).

5.5.9. Ветер как возможная составляющая моделей

Ветер учитывают в моделях в редких случаях, например, при оценке потерь тепла в сельскохозяйственных помещениях, при анализе теплообмена у животных с окружающей средой. Влияние ветра на фотосинтез и рост полевых культур незначительно и проявляется в форме различных заболеваний, распространению которых способствует ветер. Сильный ветер иногда причиняет прямой ущерб урожаю, нанося механические повреждения. При использовании обогреваемых теплиц энергозатраты находятся в прямой зависимости от скорости ветра: они пропорциональны квадрату этого параметра.

При построении моделей учитывают климатические условия конкретного района. Например, в Беларуси наиболее ветреные месяцы – май и июнь, но в целом колебания скорости ветра в течение года незначительны.

Список литературы

1. *Франс, Дж.* Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Торнли. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

5.6. Принципы построения двухпоточных моделей

Многие динамические модели продуктивности агроэкосистем используют концепцию одного потока – притекающего к фотосинтезирующим органам углекислого газа и его превращения в растениях первоначально в углеводы, а затем распределения по органам растения и перехода в структурную биомассу. При построении таких моделей нужно учесть факторы, влияющие на фотосинтез и на распределение накопленных ассимилятов.

Двухпоточные модели связаны с учетом взаимодействия в растениях углерода и азота. Эти модели предназначены для описания продукционного процесса, когда фактором, лимитирующим урожай, выступают элементы минерального питания. Главным из таких факторов является азот – наиболее динамичный из тех, что связаны с уровнем и качеством урожая. Динамика миграций и трансформаций соединений азота в почве и в растениях весьма многообразна, поэтому на данном примере могут быть проиллюстрированы принципы построения двухпоточных моделей.

Моделирование динамики азота позволяет обосновывать решения по проведению азотных подкормок в оперативном режиме с учетом складывающейся в данном сезоне агрометеорологической обстановки. При этом могут быть учтены требования по охране окружающей среды от нитратных загрязнений, а также может быть поставлена задача управления качеством урожая. Известно, что роль азота, хотя процентное содержание его в растении невелико, огромна. Дефицит азота приводит к перестройке всех функций растений, изменению их морфологических признаков и урожая. Важно учесть также избыток азота, что связано с применением неоправданно высоких доз удобрений или с погодными условиями, не позволяющими растению эффективно утилизировать имеющиеся фонды.

При построении двухпоточных моделей важно определить, какие новые переменные следует включить в модель, от каких внешних факторов наиболее сильно зависят транспорт и превращение углерода и азота, каким образом можно описать взаимодействие «углерод – азот» в растении?

На уровне двухпоточной модели в нее должны быть включены, по крайней мере, четыре группы переменных: подвижные и запасные углеводы и подвижные и запасные соединения азота. В качестве подвижных углеводов выступают сахара, а в качестве запасных – крахмал. Подвижные соединения азота – аммоний и нитраты – можно, по-видимому, объединить. Запасной блок азота можно идентифицировать с содержанием нитратов в вакуолях. Кроме того, в модели должна быть представлена структурная биомасса.

Для моделирования «перетоков» между компартментами следует описать зависимости скорости корневого поглощения азота от влияющих на нее факторов интенсивности транспортных процессов, обмена между подвижными и запасными блоками и синтеза структурной биомассы. Кроме того, в модель должны быть включены зависимости скоростей реутилизации углерода и азота, высвобождающихся в процессе распада структурной биомассы вегетативных органов. Наконец, главной задачей является формулировка принципа, на основе которого можно будет описать взаимодействие «углерод – азот» в растении. При этом важно учесть адаптивные реакции растений на условия внешней среды.

Для построения полной компартментальной схемы и представления почвенных превращений необходимо:

1) описать трансформации компонент системы внутри каждого из выделенных слоев почвы;

2) описать перетоки подвижных соединений между слоями.

Заметим, что не все присутствующие в почве субстанции подвижны. Например, гумус не переносится из слоя в слой. Слабо подвижен фосфор. С другой стороны, некоторые соединения, например, хлориды, переносятся по почвенному профилю без изменений. Почва для них является косной пористой средой. Наоборот, соединения азота подвергаются многочисленным трансформациям внутри каждого слоя почвы, а некоторые из них легко мигрируют по почвенному профилю.

Динамика минеральных форм азота в почве. Азотсодержащие почвенные соединения подвержены микробиологическим трансформациям и водной миграции в большей степени, чем соединения всех других элементов, а значит, режим азотного питания существенно зависит от неуправляемых погодных факторов. Поэтому реальный урожай лимитируется чаще всего азотом. Более того, многочисленные попытки разработать статические, так называемые балансовые модели окончились безрезультатно, поскольку фигурирующие в них коэффициенты использования питательных веществ из почвы и удобрений не являются константами, а существенно зависят от температурного режима и условий увлажнения почвы, меняющихся в динамике. Все это говорит о важности включения блока трансформации азота в комплексную модель продукционного процесса.

При построении модели трансформации и миграций соединений азота в почве мы должны учитывать соотношения трех типов:

1) уравнения, определяющие скорость перетоков подвижных соединений между отдельными почвенными слоями («вертикальные» связи между компартментами);

2) уравнения баланса различных соединений в каждом почвенном слое («горизонтальные» связи между компартментами, геометрически соответствующие каждому слою почвы);

3) соотношения, определяющие интенсивность поступления тех или иных соединений в почву («приход» азота с осадками, удобрениями, семенами) и выноса азота из почвы (распад – корневые поглощения и потери).

Полная схема взаимодействий является чрезвычайно сложной и содержит многочисленные и трудно определяемые параметры. Поэтому ее следует предварительно разумно упростить, сохранив, однако, существенные детали. Одним из таких упрощений является исключение из рассмотрения нитритных форм азота как промежуточных и слабо влияющих на общую картину. К другому упрощению относится выделение в органических остатках лишь двух фракций – быстро и медленно минерализующихся. К первым из них относятся фракции органического вещества, распад которых происходит в течение нескольких суток (аминокислоты, белки), ко вторым – полная минерализация которых происходит в течение десятков суток и даже месяцев (целлюлоза и гемицеллюлоза, лигнин).

Поскольку растения получают азот из растворенных в воде нитратов и аммония, в общую схему следует включить именно те процессы, которые в наибольшей степени влияют на концентрацию этих веществ. После этого можно будет «замкнуть» уравнения динамики, связав с переменными, входящими в почвенный блок, корневое поглощение.

Названия азотсодержащих форм азота в почве:

1. Органический азот быстро минерализующихся фракций.
2. Органический азот медленно минерализующихся фракций.
3. Азот в гумусе.
4. Органический азот в микробиальной ткани.
5. Азот в растениях.
6. Газообразный азот.
7. Аммонийный азот в обменном комплексе.
8. Фиксированный аммонийный азот.
9. Аммонийный азот в нерастворившихся минеральных удобрениях.
10. Нитратный азот в нерастворившихся минеральных удобрениях.
11. Аммонийный азот в почвенном растворе.
12. Нитратный азот в почвенном растворе.

Название процессов трансформации азотсодержащих форм в почве:

1. Минерализация гумуса (v_k).
2. Аммонификация органических остатков (v_{am}).
3. Растворение удобрений (v_{ams}, v_{ns}).
4. Поглощение аммония и нитратов корнями (v_{amr}, v_{nr}).
5. Потери, вызванные денитрификацией (v_l).
6. Переход аммония в обменную форму и обратно (v_{ch}, v_{dch}).
7. Переход аммония в фиксированное состояние (v_f).
8. Нитрификация (v_{na}).

9. Иммобилизация аммония и нитратов (v_{amas}, v_{nmas}).

10. Перетоки нитратов между почвенными слоями (v_{nw}).

Исходя из условий баланса можно записать два соотношения, определяющие суммарные скорости накопления (или расходования) нитратов *NA* (v_n) и аммония *AM* (v_a) в почвенном растворе:

$$v_n = v_{na} + v_{ns} - v_{nr} - v_l - v_{nmas} ,$$

$$v_a = v_h + v_{am} + v_{ams} + v_{dch} - v_{na} - v_{ch} - v_{amas} - v_{amr} .$$

Далее вспомним особенности превращений азота в почве.

Аммонификация. Скорость аммонификации включает в себя две составляющие, каждая из которых соответствует разложению двух форм органики. Если исключить чрезвычайно медленный процесс утилизации лигнина, то к медленно разлагающейся фракции можно отнести целлюлозу и гемицеллюлозу (индекс *s* (slowly)), а к быстро разлагающейся – аминокислоты и белки (индекс *q* (quikly)).

$$v_{am} = k_q\left(N_q^0 - AM_q\right) + k_s(N_s^0 - AM_s) ,$$

где k_q, k_s – константы скоростей реакций; AM_q, AM_s – текущее количество аммония, высвобождающегося за счет процесса аммонификации; N_q^0, N_s^0 – содержание азота в каждой из фракций в начальный момент времени.

Константы реакций определяются биологической активностью почвы и зависят от pH, температуры и влажности почвы, обеспеченности процесса кислородом.

Иммобилизация. В процессе минерализации органических соединений образуется ферментативно-сбраживаемый субстрат, потребляемый микроорганизмами и идущий на построение их биомассы. В качестве источника энергии при этом используется органический углерод, высвобождающийся в процессе разложения органики. В условиях, близких к оптимальным, можно считать, что азот, потребляемый в виде нитратов и аммония почвенной микрофлорой, составляет некоторый процент от того, который образуется в цепи реакций нитрификации. Это означает, что не весь азот переходит в доступную форму. Его определенная часть «ответвляется» и аккумулируется в микробиальной ткани:

$$v_{amas} = \beta_1 v_{am} ; \;\; v_{amas} = \beta_1 v_{am} .$$

Разумеется, в более полные модели необходимо включать дополнительные уравнения, учитывающие динамику популяций почвенных микроорганизмов.

Минерализация гумуса. Если учесть, что в течение одного сезона вегетации содержание гумуса в почве практически не изменяется, то

для описания процесса его минерализации можно воспользоваться уравнением

$$v_h = k_h N_h ,$$

где N_h – содержание гумусного азота в почве.

При этом под термином «гумусный азот» понимается сумма как собственно органического азота гумуса, так и азота отмирающей микробиальной ткани, которая подвергается непосредственной минерализации.

Нитрификация. При малых концентрациях аммония в почвенном растворе *AM* скорость нитрификации линейно растет с ростом этой концентрации, а при больших концентрациях стремится к постоянной величине:

$$N_{na} = v_{na}^{max} \cdot AM/(1 + k_{na} \cdot AM) .$$

Максимальная скорость нитрификации, как и скорость аммонификации, зависит от параметров состояния почв, однако, поскольку бактерии-нитрификаторы являются автотрофами, их активность определяется также содержанием кислорода в почвенном воздухе и, следовательно, в растворе.

Денитрификация. Денитрификация происходит в анаэробных условиях при резком дефиците кислорода, т. е. при условии $C_{O_2} < C_{\text{кр}}$, где $C_{\text{кр}} \approx 0{,}00642$ см^3 O_2/мл раствора.

Спилиометрические расчеты показывают, что на окисление 1,0174 г органического углерода требуется 1 г азота, входящего в состав нитратов. Таким образом, скорость денитрификации может лимитироваться одним из двух субстратов. При наличии избыточного количества органического углерода она пропорциональна текущему количеству нитратов, т. е.

$$v_l(1) = k_d \cdot F_d \cdot NA ,$$

где k_d – константа реакции; F_d – множитель, зависящий от внешних условий (в частности, $F_d = 1$ при концентрации кислорода, намного меньше критической). В случае избытка нитратов скорость денитрификации лимитируется интенсивностью высвобождения углерода в процессе аммонификации:

$$v_l(2) = k_q\left(C_q^0 - C_q\right) + k_s(C_s^0 - C_s) ,$$

где C_q^0 и C_s^0 – начальное содержание углерода в двух фракциях органического вещества; C_q и C_s – соответственно их текущие величины, образующиеся в процессе разложения.

На скорость денитрификации оказывают влияние также температура почвы и ее кислотность.

Динамика азота и углерода в растении. Описание динамики взаимодействия углерода и азота в растении замыкает модель азотного цикла в агроэкосистеме. Включение лимитирования по азоту позволяет принципиально по-иному подойти к описанию физиологических блоков модели, учесть новые адаптивные реакции растений на условия их выращивания на той основе, которая выше названа «концепцией двух потоков».

Растения в своем жизненном цикле проходят три основные стадии – прорастания семян (гетеротрофное развитие), вегетативного и генеративного роста. Естественно, что роль и кинетика превращений азота и его взаимодействия с углеродом на всех трех стадиях различны. Поэтому остановимся на описании каждой из них в отдельности.

Прорастание семян. Прорастание семян после посева начинается, как известно, при определенных условиях увлажнения и в определенном диапазоне температур. Семена озимой пшеницы, например, прорастают и при температуре 2 °С, однако этот процесс происходит чрезвычайно медленно. С повышением температуры скорость прорастания увеличивается. При температуре выше 24 °С процесс прорастания замедляется. Отрицательно сказывается на процессе прорастания как избыток влаги, так и ее недостаток.

Собственно процесс прорастания можно разделить на три периода:

1. Набухание семян, представляющее собой чисто физический процесс. Если семена высушить после набухания, их сухая масса становится равной первоначальной.

2. Период чисто гетеротрофного питания проростков. Начинается с того момента, когда поглощенная вода включается в метаболизм семени. При этом происходит гидролиз углеводов и белков, локализованных в запасном органе, их транспортировка в проросток и образование структурной биомассы проростка.

3. В метаболизм включается экзогенный азот, поступающий из почвы, а затем и углерод воздуха.

Рассмотрим некоторые детали. Движущей силой, определяющей поглощение воды семенем, является разность водных потенциалов почвы и семени. Поэтому в почвах, различных по своему механическому составу, набухание семян при одной и той же влажности происходит по-разному. Поток влаги, поступающий внутрь семени (v_g), описывается уравнением

$$v_g = S_g Q_g (p - P_g(t)) ,$$

где p и $P_g(t)$ – водный потенциал соответственно почвы и семени; Q_g – проводимость оболочки семени; S_g – поглощающая поверхность.

С ростом влажности семени абсолютная величина его водного потенциала падает и при $p = P_g(t)$ наступает равновесие. Если теперь перенести семя в более сухую среду, характеризующуюся меньшим значением р (напомним, что величины p и P_e отрицательны), влага будет отдаваться семенем в окружающую среду. Процесс «обратимого» набухания в условиях достаточного увлажнения протекает в течение 8–14 ч.

Первой реакцией семян на проникновение воды через оболочку является активация обмена веществ. Практически все органы и ткани семени содержат, помимо белков, жиров и полисахаридов, низкомолекулярные соединения – сахара и аминокислоты. Эти соединения и активируются в первую очередь. Аминокислоты утилизируются главным образом в процесс дыхания для выработки АТФ, участвующей затем в различных процессах метаболизма. Через 10–20 ч после набухания наступает лаг-период. Последующее усиление метаболизма совпадает с началом гидролиза белков, полисахаридов и жиров, к 36–48 ч усиливается передвижение веществ из запасающих тканей в зародыш.

В процессе прорастания семени по мере истощения его запасных соединений ослабляется утилизация гетеротрофных источников углерода и азота. При этом усиливаются поглощение азота из почвы сформировавшимися к этому времени зародышевыми корнями и автотрофное усвоение растением углекислоты за счет фотосинтеза. В естественных условиях прорастания семян растения практически одновременно потребляют азот почвы и азот запасающих тканей семени. Эта закономерность отмечается у растений, чьи семена содержат относительно мало азота, – ячменя, кукурузы, пшеницы. В противоположность этому горох, например, может развиваться и при отсутствии азота в питательной среде в первые недели роста.

Стадия вегетативного роста. Фаза всходов заканчивается через 4–8 дней после появления первого настоящего листа. В этот момент у пшеницы, например, начинает формироваться узел кущения главного побега. После формирования всходов растения уже в полной мере осуществляют свои ростовые функции путем использования двух потоков – поступления минеральных веществ (азота) снизу и углерода сверху. Скорость поглощения азота корнями (v_{nr}) можно выразить следующим уравнением:

$$v_{nr} = \frac{v_m \cdot NA \cdot C_{mob}^r}{v_m \cdot (k_1 \cdot C_{mob}^r + k_2 \cdot NA) + NA \cdot C_{mob}^r},$$

где v_m – максимальная скорость поглощения нитратов, определяемая анатомическим строением корня; NA – содержание нитратов в почве; C_{mob}^r – содержание мобильных соединений углерода в корнях; k_1, k_2 – параметры.

Уже на этом этапе происходит взаимодействие углерода и азота в растении.

Оказалось, что последовательно реализовать в модели «концепцию двух потоков» невозможно, если наряду со структурными и лабильными пулами не ввести в рассмотрение пулы запасных веществ.

В реальной жизни растения, по-видимому, не существуют без запасов, что позволяет им пережить трудные времена, связанные с временным дефицитом тех или иных субстанций. Модель должна естественным образом отразить этот факт, иначе она не может претендовать на адекватность моделируемой системе. Причиной, вызывающей необходимость включения в модель запасных пулов, является динамичность и изменчивость внешних условий, не позволяющих растению в каждый момент времени идеально использовать оба потока для согласованного роста и развития различных органов. Всегда либо углерод, либо азот окажутся в относительном избытке. И этот избыток должен быть либо выведен из организма растения, либо отправлен в резерв.

Рассмотрим первоначально случай дефицита по азоту на вегетативной стадии роста. При малом дефиците может возникнуть ситуация, когда азота еще достаточно, чтобы выдержать оптимальное отношение $N : C$ для корней и стебля. Тогда их прирост за шаг модели не уменьшается, а весь дефицит азота сказывается на уменьшении потока N в листьях. Относительно избыточный органический углерод отправляется в запас. Дальнейшее снижение уровня азотного питания приводит к тому, что начинается угнетение роста стебля. Дальнейшее снижение уровня азотного питания приводит к тому, что весь подвижный азот листьев, получаемый в процессе распада белков, направляется в корни. Растение в конце концов «съедает себя» и погибает.

Рассмотрим обратную ситуацию, а именно случай относительного избытка азота. В этих условиях формирование различных органов растения происходит в соответствии с ростовыми функциями, а избыток азота направляется в резерв. Если емкость резервного пула заполнена, избыток азота выводится из растения в почву.

Выше мы рассмотрели два крайних случая в «чистом» виде. На самом деле в ходе вегетации ситуация меняется. В ранне-весенний период азот благодаря низкой скорости минерализации почвенной органики может оказаться в минимуме. Затем после укоса трав в минимуме может оказаться углерод. К концу вегетации, если не проводятся подкормки, всегда в качестве лимитирующего фактора выступает уровень азотного питания. Таким образом, в модели балансы между мобильными, резервными и структурными пулами должны рассчитываться на каждом временном шаге. Фактически в растениях резервные пулы создаются всегда, поскольку точно выдержать стехиометрическое соотношение в каждые сутки невозможно. Кроме того, поступление ассимилянтов

и минеральных веществ в резервный пул происходит значительно легче, чем их извлечение. На добывание *C* и *N* из резерва затрачивается энергия, т. е. должны расходоваться те же мобильные углеводы.

Стадия генеративного роста. В стадии вегетативного роста основными «акцепторами» *C* и *N* являются корни. В фазе стеблевания к ним добавляются стебли. Именно эти органы «диктуют» растению способ расходования поступающих веществ на построение тех или иных органов. В стадии генеративного роста эта роль переходит к колосу. При этом на стадии вегетативного роста производится закладка будущего урожая (потенциального урожая данного года), а условия вегетации стадии генеративного роста определяют, реализуется ли этот потенциальный урожай полностью или частично.

В модели этот процесс описывается следующим образом. Условия, складывающиеся на вегетативной стадии, приводят к формированию не только биомассы различных вегетативных органов (листьев, стеблей, корней), но и «емкости бункера» потенциального урожая. На стадии генеративного роста эта емкость наполняется структурной биомассой. При этом, разумеется, урожай не может превысить той величины, которая уже определена на вегетативной стадии как «емкость бункера урожая». Физиологически с понятием «емкости» можно отождествить число растений на 1 м^2 поля, число продуктивных стеблей одного растения, число колосков в колосе, число цветков в колоске.

Наполнение бункера связано с фертильностью и стерильностью цветков, а также с выполненностью колоса. При этом, если на вегетативной стадии роста реутилизация углеводов и белков может выступать лишь как эпизод, связанный с резкой нехваткой органического углерода или азота, то на стадии генеративного роста это превращается в правило. Конкуренция здесь происходит лишь в зависимости от энергетических затрат – при изобилии азота в почве он легко доступен, а при его нехватке проще использовать азот из резерва или мобильного пула аминокислот, полученных в результате распада белков. Что же касается углерода, то он в большой степени потребляется колосом за счет реутилизации в связи с естественным пожелтением и отмиранием листьев.

С помощью прикладных моделей решаются следующие задачи прогноза и управления:

1. Задача анализа. Эта задача возникает тогда, когда сезон вегетации закончен и погода известна. Тем не менее, всегда остается сомнение в том, все ли сделано для получения желаемого урожая. Поскольку величина урожая в модели формируется исходя из свойств почвы, растения и погоды, можно, производя расчет, сравнить его результат с фактическим урожаем. Подробный анализ может выявить те места, в которых были допущены ошибки (поздние сроки сева, неоптимальные дозы удобрений и норм поливов и т. д.). Во всяком случае, модель здесь даст

идеальную картину, к которой надо стремиться. Сравнивая с ней реальность, можно, по крайней мере, оценить уровень своей квалификации и умение принимать правильные решения.

2. Тренинг и обучение. Эта задача является, по-существу, обобщением предыдущей. Действительно, любая модель сопровождается банком многолетних погодных данных и банком почвенных характеристик. Проигрывая модель на разных почвах в различных погодных условиях, можно существенно повысить уровень своей интуиции. Если в банке погоды хранятся реальные метеорологические условия за последние 20–30 лет, то очевидно, что при моделировании встретятся практически все ситуации, которые можно ожидать в ближайшем будущем. Работая с моделью в ускоренном времени, можно проанализировать большой спектр сочетаний внешних условий и агротехнологий. Тем самым можно уже получить вполне определенные представления о том, что такое хорошо и что такое плохо в тех или иных условиях, которые могут встретиться.

3. Оценка агрометеорологической обстановки и текущего состояния посевов. Помимо общего анализа, модель следует использовать для оценки текущей ситуации, складывающейся в данном сезоне вегетации. Смысл этой задачи заключается в том, что полученная в результате ее решения информация дополняет те сведения о состоянии посевов, которые можно получить визуально. Хороший агроном периодически осматривает посевы. Но многое ли он может увидеть? Хотя это и зависит от его опыта и квалификации, тем не менее, многое из того, что определяет судьбу посева, остается недоступным при таких осмотрах. Использование модели способствует получению более детальных представлений о том, что происходит «внутри». Действительно, поскольку все переменные модели формируются на основе учета погодных данных, проведение соответствующих расчетов позволяет оценить в разрезе сельскохозяйственных полей и культур почвенные влагозапасы, содержание питательных элементов в почве и растениях, интенсивность накопления биомассы различными органами, формирование корневой системы и т. д. Модель здесь заменяет некоторый гипотетический «измерительный прибор» или, точнее, «измерительную систему». С ее помощью можно рассчитывать интересующие нас параметры, а не измерять их.

4. Районирование новых сортов. Вновь выведенный сорт имеет неопределенный ареал своего распространения. Ясно, что если сорт оказался более продуктивным в том месте, где он выводится, то его следует рекомендовать производству. Но где расположена граница районирования данного сорта? Это можно выяснить, проигрывая модель для тех погодных условий и тех почв, которые характерны для того или иного места выращивания. Отодвигая границы моделирования от места вы-

ведения сорта, например, в четырех направлениях (север, юг, восток и запад), можно найти точки, где данный сорт способен обеспечить те характеристики, которыми его наделил селекционер.

5. Задача динамического прогноза урожая. Эта задача должна решаться в оперативном режиме. Абсолютный прогноз нам известен в том смысле, что известны значения минимально возможного и максимального урожаев (статистические данные за последние 10–15 лет). Вопрос заключается в сужении этой «вилки». Будем осуществлять это последовательно. На первом шаге можно принять во внимание такие факторы, как весенние влагозапасы и доступные формы азота в почве, даты всходов, густоту посева. Далее можно обращаться к решению задачи в моменты наступления следующих фенофаз. При этом на каждом последующем шаге величина допуска уменьшается, а при получении реального урожая она «стягивается в точку».

6. Задача управления. Будем рассматривать ее на примере назначения норм и сроков полива. Традиционно эта задача решается двумя способами: либо путем назначения нормативных показателей (программное управление), либо на основе коррекции этих показателей с учетом складывающихся в сезоне метеорологических условий (управление по возмущению). Появление моделей создает принципиально иную основу для ее решения. При этом возникает возможность создания систем управления с обратной связью. Однако в орошаемом земледелии реализация подобного принципа имеет свою специфику. Если в технических системах для введения обратной связи используются измерения выхода объекта управления, то здесь в качестве «измерителя» выступает динамическая модель. Именно проигрывая на модели возможные ситуации и анализируя их последствия, мы должны выбирать ту стратегию управления, которая, по нашему мнению, приведет к успеху.

Другое отличие связано с односторонним характером управления. Действительно, мы можем лишь увеличивать влагозапас почвы за счет полива и не в состоянии изымать избыток влаги из почвы, если не принимать во внимание достаточно редко встречающиеся системы двойного регулирования. Назначая любую норму полива, мы должны были бы знать будущие осадки, что невозможно. Поэтому здесь возникает специальная задача достижимости цели управления. А ее решение должно быть основано на принципе «непопадания в необратимую ситуацию». Управлять надо так, чтобы не лишить себя возможности коррекции поведения объекта управления (агроэкосистемы) в будущем. Поэтому, учитывая неопределенность в будущих осадках, нормы полива должны быть занижены по сравнению с оптимальными. К сожалению, в реальной жизни мы поступаем как раз прямо противоположно.

Список литературы

1. *Измайлов, С. Ф.* Азотный обмен в растениях / С. Ф. Измайлов. – М.: Наука, 1986. – 320 с.

2. *Полуэктов, Р. А.* Имитационная модель продуктивности агроэкосистемы / Р. А. Полуэктов // Tag. Ber. Akad. Landwirtsch. – Wiss. – Berlin, 1981. – P. 19–27.

3. *Полуэктов, Р. А.* Динамические модели агроэкосистемы: монография / Р. А. Полуэктов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 311 с.

5.7. Комплексная модель продукционного процесса растений

5.7.1. Схема процессов в агроэкосистеме

Одной из наиболее продвинутых областей в математической экологии является моделирование продукционного процесса растений. Это определяется практической значимостью таких моделей для оптимизации агрокультуры и тепличного хозяйства. Здесь математические модели используются для выбора оптимальной стратегии проведения сельскохозяйственных мероприятий: полива, внесения удобрений, выбора сроков посева или посадки растений с целью получения максимального урожая. Для полностью контролируемого тепличного хозяйства возможно построение модели, описывающей весь цикл процессов при заданных условиях. Тогда с помощью модели оптимальный «рецепт» управления культурой может быть задан полностью на все время вегетации.

Если же моделируется посев в открытом грунте, на который оказывают влияние непредсказуемые погодные условия, агробиоценоз нуждается в оперативном управлении, для него используются динамические модели, допускающие оперативное изменение параметров и, возможно, структуры модели в соответствии с изменениями погодных условий.

Всю систему происходящих в агробиоценозе процессов обычно представляют в виде блочной иерархической структуры. Существуют биотический и абиотический блоки. Среди биотических процессов выделяют в отдельные блоки рост и развитие посева, функционирование почвенной микрофлоры, развитие энтомофауны, развитие болезней сельскохозяйственных культур, взаимодействие посева с сорняками и др. Абиотические блоки включают в себя модели, описывающие формирование теплового, водного режима почвы и приземных слоев воздуха, концентрации и передвижения биогенных и токсических солей, различных остатков распада пестицидов, ростовых веществ и метаболитов в почве, концентрации углекислого газа в посеве. Пример блок-схемы модели продуктивности агроэкосистемы приведен на рисунке 42.

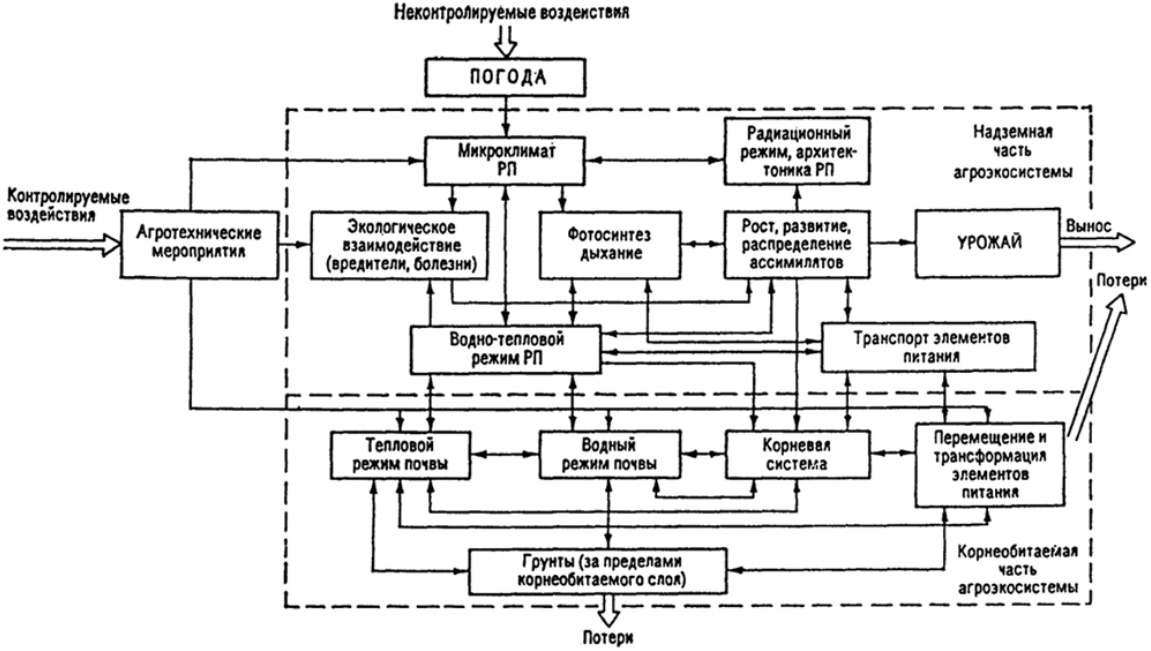


Рис. 42. **Схема взаимодействия процессов в агроэкосистеме пшеницы**

Блочная структура позволяет изучать, изменять и детализировать одни блоки, не меняя другие. Как правило, число параметров внутри блоков существенно больше числа параметров, которыми блоки соединяются между собой. На основе блоков синтезируются целостные динамические модели, способные прогнозировать изменение во времени ряда характерных параметров растений, в первую очередь биомассу всего растения и отдельных органов, начиная от всходов (иногда от момента посева) до завершения вегетации (созревания).

Структура и сложность модели продукционного процесса растений, степень ее детализации, форма представления происходящих в растении процессов определяются двумя обстоятельствами: предметом и целью моделирования. Модель роста травы, биомассу которой можно считать однородной, предназначенной для корма скота, может быть существенно проще, чем модели культур, урожай которых заключен в репродуктивных органах (злаки, бобовые) или корнеплодах. Для практических целей удобнее простая модель, позволяющая давать прогноз урожая при определенных погодных условиях или рекомендации по оптимальному режиму полива и внесения минеральных удобрений. Изучение физиологических особенностей растений и их реакций на почвенные и погодные условия требует построения сложных моделей с блочной структурой.

5.7.2. Модель продукционного процесса, основанная на балансе воды

В некоторых случаях на практике целесообразно упрощать сложную картину происходящих в агроэкосистеме процессов. При этом создают прикладные модели, которые должны быть специализированы, нацелены на решение вполне определенного круга задач. Другими словами, принцип универсальности, положенный в основу построения базовой (комплексной) модели, должен быть заменен принципом специализации. Можно иметь множество моделей, каждая из которых предназначена для решения узкого класса задач.

В связи с этим цель моделирования должна быть явно указана при построении той или иной прикладной модели. Упрощение общей ситуации может быть выполнено двумя способами. Во-первых, в прикладные модели можно включать только часть блоков из тех, что входят в состав базовой. Во-вторых, описание каждого блока или их части может быть загрублено. При этом важно глубоко понимать сущность моделируемых процессов и сохранить в прикладной модели основополагающие компоненты базовой.

Одной из самых простых прикладных моделей является модель продуктивности, основанная на динамике почвенной влаги. Действительно, почвенная влага (а точнее, ее недостаток или избыток) всегда лимитирует урожай. Даже в условиях орошаемого земледелия в силу

ряда причин нельзя избежать условий частичного пересыхания почвы или ее переувлажнения.

Выделим расчетный слой почвы определенной глубины (например, 100 см). Условия баланса воды в этом слое за сутки можно записать в виде

$$W(k+1) = W(k) + \sum_{i-1}^{I} j_i(k),$$

где $W(k)$ – влагозапас расчетного слоя; j_i – потоки воды, втекающие в расчетный слой ($j_i > 0$) и вытекающие из него ($j_i < 0$); I – общее число потоков.

Опишем эти потоки. Суточная сумма осадков может не полностью впитаться в почву – возможный боковой сток j_1 задается коэффициентом c_1. Поэтому

$$j_1 = (1 - c_1) \cdot Q_{pr}.$$

Влагообмен на нижней границе зависит от уровня грунтовых вод. В случае их глубокого залегания избыток влаги должен удаляться из расчетного слоя, а при низкой влажности почвы возможен режим подпитки. Поэтому для потока на нижней границе расчетного слоя j_2 можно записать:

$$j_2 = c_2 (W_0 - W(k)),$$

где W_0 – константа, которая определяется как произведение наименьшей влагоемкости и толщины расчетного слоя почвы; c_2 – представляет собой коэффициент диффузии (с размерностью сут$^{-1}$, должен быть достаточно малым в случае тяжелой почвы и большим – для легких супесчаных и песчаных почв).

Наконец, третий поток j_3 характеризует эвапотранспирацию (суммарное испарение, т. е. количество влаги, переходящее в атмосферу в виде пара в результате поглощения корнями растений и последующей транспирации (физиологическое испарение), и физического испарения из почвы и с поверхности растительности, выражается в мм):

$$j_3 = E.$$

Таким образом, баланс влаги в расчетном слое будет складываться с учетом бокового стока, влагообмена на нижней границе и испарения.

Затем можно рассчитать величину возможного урожая культуры ($У_в$) по формуле

$$У_в = У_п * К_{увл},$$

где $У_п$ – потенциальная урожайность, рассчитанная по приходу ФАР; $К_{увл}$ – коэффициент увлажнения:

$$K_{увл} = \frac{586 * W}{10^4 * \sum_{ФАР}},$$

где 586 – скрытая теплота испарения одного литра воды, ккал; W – водообеспеченность культуры за период вегетации, мм; $\Sigma_{ФАР}$ – суммарный приход ФАР за период вегетации, ккал/см^2.

5.7.3. Экологические взаимодействия в агроэкосистеме

Все экологические взаимодействия в агроценозе можно разделить на полезные и вредные. Полезные способствуют повышению продуктивности агроэкосистем, а вредные снижают выход продукции, ради которой культивируют сельскохозяйственные растения. Первые из них протекают главным образом в почве, замыкая круговорот органического вещества и способствуя поддержанию почвенного плодородия. В почвенных процессах участвует практически вся почвенная биота, начиная от микроорганизмов и заканчивая многоклеточными животными и грызунами. Разложение отмерших растительных остатков, несимбиотическая азотфиксация, минерализация гумуса и иммобилизация важны для продуктивности агроэкосистем. В моделях они учитываются, как правило, косвенно: от биологической активности почв зависят параметры модели, определяющие интенсивность трансформации в почве соединений азота и фосфора.

Другая группа экологических процессов – это развитие конкурентных взаимодействий культурных растений с сорняками, паразитирование на них различных видов микроорганизмов или вспышки численности вредных насекомых, приводящие к большим потерям урожая. Взаимодействия такого рода описывает модель динамики популяции колорадского жука, развивающейся на картофельном поле. В качестве компонентов модели агроэкосистемы картофельного поля А. И. Бреженев и В. Г. Малинина [1] рекомендуют:

- блок роста и развития картофеля;
- блок, характеризующий динамику численности и возрастной структуры колорадского жука;
- блок энерго- и массобмена в среде описания растений;
- блок развития естественных врагов колорадского жука (златоглазки, периллюса);
- блок антропогенных воздействий (обработка почвы, опрыскивание инсектицидом).

Динамика развития надземной фитомассы описывается разностными уравнениями с шагом в одни сутки. Учет повреждаемости ботвы картофельного куста произведен путем включения в уравнения баланса части надземной биомассы, изъятой для питания жуками и личин-

ками, зависящей от численности и возрастной структуры популяции колорадского жука. Для учета зависимости вредоносности насекомых от стадии развития в модели учтена возрастная структура популяции. Выделены следующие переменные модели:

- численность отложенных яиц (x_1);
- суммарная численность личинок 1 и 2 возрастов (x_2);
- суммарная численность личинок 3 и 4 возрастов (x_3);
- численность куколок (x_4);
- численность в трех возрастных стадиях имаго: молодых жуков летней генерации текущего года (x_5); перезимовавших жуков среднего возраста (x_6) и жуков, заканчивающих свой жизненный цикл в текущем году (x_7).

Полученная система уравнений описывает экологические взаимодействия в биоценозе картофельного поля с учетом влияния на их динамику погодных условий и совокупности агротехнических мероприятий.

5.7.4. Модель посева сои

Первые блочные модели были разработаны коллективом американских авторов [8]. В настоящее время имеется несколько десятков такого типа моделей формирования урожая, разработанных с разной степенью детализации для сои, пшеницы, трав, кукурузы, хлопчатника и других культур. На рисунке 43 приведена блок-схема модели посева сои, которая представляет имитационное описание роста, развития и урожайности сои и считается одной из первых подробных моделей роста сельскохозяйственных культур [7]. В ней объединены несколько субмоделей и большое количество входных данных (данные о растениях, особенностях посева, климатические данные и почвенные характеристики). В модели SOYMOD учтены параметры сухого вещества: структурные углеводы, доступные углеводы (неустойчивые соединения, которые могут передвигаться по растению), крахмал и белок. Эти вещества распределяются между различными морфологическими частями: пластинками и черешками листьев, плодами и корнями. Предполагается, что необходимые для процессов роста и жизнедеятельности растения материалы – это азот и углерод. Они перемещаются между морфологическими частями растения и реализуются в этих частях для роста, дыхания, образования новых органов, транспортных процессов. Соотношение между углеродом и азотом используют в качестве функций контроля за ростом различных частей растения. В этом смысле модель сои относится к моделям углеродно-азотного типа.

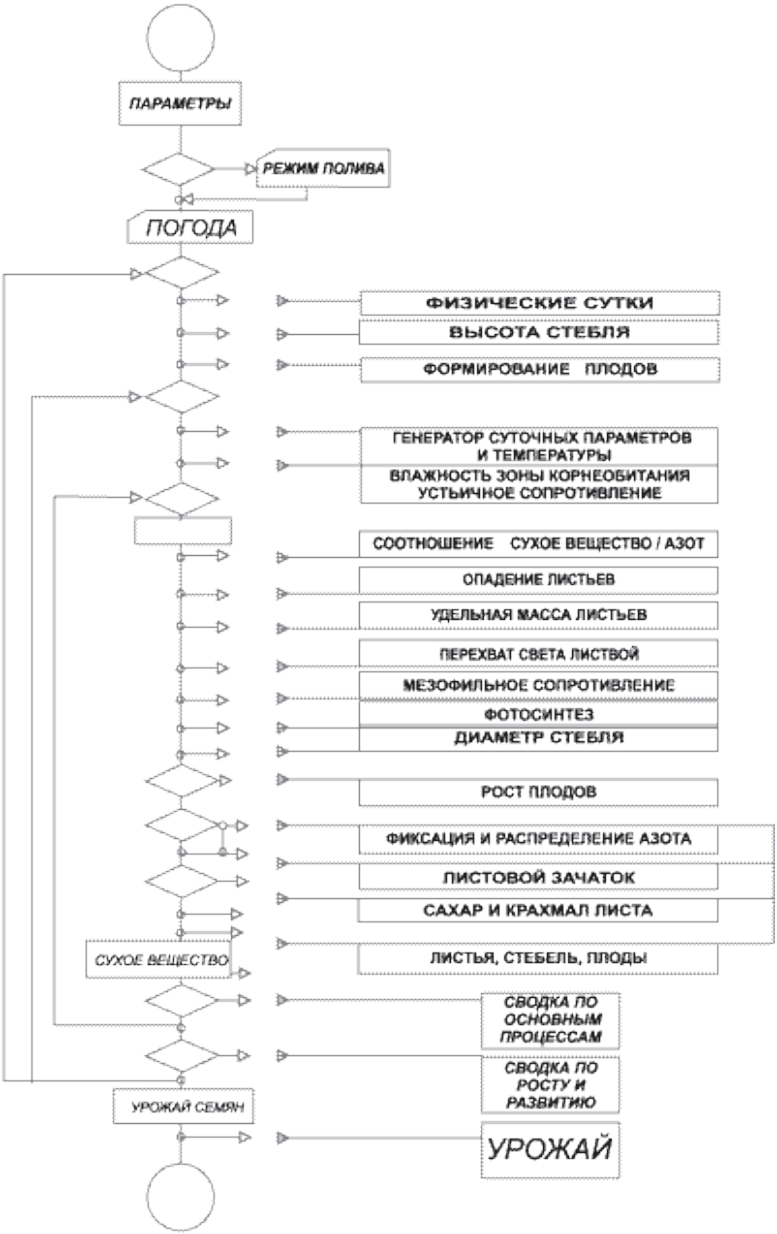


Рис. 43. **Блок-схема модели сои**

5.7.5. Модель агрофитоценоза пшеницы

Модель агрофитоценоза пшеницы (система СИМОНА) – одна из детальных имитационных моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений, разработанная под руководством Р. А. Полуэктова в Петербургском агрофизическом институте. С математической точки зрения модель представляет собой систему из нескольких уравнений в частных производных параболического типа и нескольких десятков обыкновенных дифференциальных уравнений. При переходе к численной схеме выбирают шаг интегрирования по координате x и по времени t. Базовый временной шаг модели выбран равным одному часу, это позволяет имитировать суточный ход как абиотических (энергообмен), так и биотических (фотосинтез, метаболизм) процессов. Состояние абиотической части системы характеризуется набором вертикально распределенных переменных: радиации, температуры и влажности воздуха в посеве, температуры и влажности почвы и др. Биологическая часть системы представлена переменными: плотность ассимилирующей поверхности фитоэлементов, плотность поглощающей поверхности корней, плотность отдельных составляющих биомассы (углеводы, аминокислоты, белки) и фитомассы в целом и др.

В модель включено описание процессов трех типов:

1) энерго- и массообмен, происходящие в среде обитания растений (в почве и приземном воздухе) и в самих растениях;

2) совокупность биофизических и физиологических процессов в растительном покрове, определяющих прирост биомассы, рост и развитие отдельных органов растения и формирования урожая;

3) экологическое взаимодействие культурных растений с сорняками, болезнетворными микроорганизмами и вредителями.

В качестве входных переменных выступают контролируемые (агротехника) и неконтролируемые (погода) внешние воздействия. Динамика погодных условий представлена реализациями многомерного случайного процесса. Каждый блок представляет собой описание группы однородных физических, биофизических, биохимических или физиологических процессов в отдельных частях системы «почва – растение – атмосфера», решает свою математическую задачу и может быть верифицирован (т. е. проведена проверка правильности его работы) на независимых массивах экспериментальных данных. Объединение блоков в целостную систему и возможная последующая редукция (упрощение) этой системы представляют собой также самостоятельную задачу из области теории сложных систем.

Модели типа SOYMOD или СИМОНА слишком сложны для использования в практике. В своем полном объеме такие модели, действительно, служат исследовательским целям, причем они непрерывно развиваются, их структура и значение параметров уточняются с исполь-

зованием новейших данных о характеристиках моделируемой системы. Их тщательный анализ открывает путь и для практических применений. Потребитель может вести диалог для решения конкретных практических вопросов сельскохозяйственного производства. Например, запрашивать возможные пределы изменения урожая для конкретного поля, задавая величину и сроки выпадения осадков, или решать оптимизационные задачи о сроках и дозах внесения удобрений.

Из приведенных примеров ясна степень сложности имитационных моделей для изучения живых систем. В работу по составлению, проверке и использованию одной такой модели вовлечены специалисты разных областей: агробиологи, почвоведы, метеорологи, биохимики, экологи, энтомологи и т. д. Математики и программисты, по существу, занимаются обобщением и анализом их рекомендаций. Но они, обычно, не в состоянии понять даже специальную терминологию отдельных областей. Поэтому биологи, специалисты сельского хозяйства, рассчитывающие извлечь пользу из современных методов моделирования, должны быть подготовлены к сотрудничеству с математиками, в частности, понимать принципы и проблемы моделирования.

Список литературы

1. *Брежнев, А. И.* Математическое моделирование экологических взаимодействий в агроэкосистеме «картофель – вредитель – среда обитания» / А. И. Брежнев, В. Г. Малинина // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982. – 262 с.

2. *Брежнев, А. И.* Математическая модель динамики численности и возрастной структуры популяции колорадского жука. Защита растений / А. И. Брежнев, В. Г. Малинина, В. И. Кирилов. – Л., 1984. – С. 37–39.

3. *Кузьмин, И. И.* Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты / И. И. Кузьмин, Н. А. Махутов, С. В. Хетагуров. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та экономики и финансов, 1997. – 163 с.

4. *Полуэктов, Р. А.* Динамические модели агроэкосистемы: монография / Р. А. Полуэктов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 311 с.

5. *Полуэктов, Р. А.* Динамические модели экологических систем / Р. А. Полуэктов, Ю. А. Пых, И. А. Швытов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 288 с.

6. *Смиряев, А. В.* Моделирование: от биологии до экономики: учебное пособие для студентов специальности «Селекция и генетика сельскохозяйственных культур» / А. В. Смиряев, А. В. Исачкин, Л. К. Харрасова. – М.: Изд-во МСХА, 2002. – 122 с.

7. *Франс, Дж.* Математические модели в сельском хозяйстве / Дж. Франс, Дж. Торнли. – М.: Агропромиздат, 1987. – 400 с.

8. A dynamic simulation of soybean growth, development, and seed yield. I. Theory, structure, and validation / G. E. Meyer [etc] // Research Bulletin of the Ohio Agricultural Research and development Center. – P. 1113.

5.8. Безопасность и риск. Управление рисками

5.8.1. Природные и техногенные риски

Человечество на протяжении всей своей истории постоянно подвергалось действию неблагоприятных или даже несовместимых с жизнью факторов. По мере развития цивилизации одни опасности исчезали, другие возникали. Первые опасности были в большей мере природного характера, позже – техногенного.

Проблемы оценки рисков при возникновении катастроф природного и техногенного характера приобрели особую актуальность на рубеже XX–XXI вв. Если принять, что история человеческого существования измеряется протяженностью 1,5–2,5 миллионов лет, то для человека потенциальные опасности природного происхождения характеризуются выраженным наложением цикличности на медленно (на протяжении сотен миллионов и миллиардов лет) и монотонно протекающие процессы на Земле и в Космосе. Глобальные изменения состояния земной поверхности, Мирового океана и климата на Земле в связи с гелио-геопроцессами характеризуются большими циклами – от 10–20 тысяч лет до 500–1100 тысяч лет и более. Они вызывают глобальные потепления и похолодания, вариации положения земной оси, магнитного поля, состояния атмосферы, стратосферы и ионосферы.

На эти монотонные и циклические процессы могут накладываться случайные (с чрезвычайно малой вероятностью до 10^{-8}–10^{-9} и менее в год) планетарные природные катастрофы, обусловленные резкими изменениями активности Солнца, прохождением планет через астероидные и метеоритные пояса с возможными столкновениями.

Указанные выше монотонные, циклические и случайные процессы земного и космического масштаба приводят к кардинальным изменениям условий жизни на Земле. Закономерности и параметры этих процессов очень сложно исследовать, а тем более противостоять им. Поэтому глобальные катастрофы, затрагивающие все живое на Земле, должны быть пока отнесены к гипотетическим, а степень реальной защищенности от них чрезвычайно мала. Последствия такого рода общепланетарных катастроф могут оцениваться как предельные, когда вероятность уничтожения жизни на Земле приближается к 100 %. В этом случае риск летального исхода, обычно измеряемый числом смертей на 1000 человек, также составит 10^3. При общем числе жителей на Земле в настоящее время порядка 5×10^9 и вероятности возникновения общепланетарных природных катастроф в 10^{-6}–10^{-9} ед./год риск летального исхода для человека при такой катастрофе составляет 5×10^0–5×10^3, а риск уничтожения жизни будет 10^{-6}–10^{-9} ед./год.

Летальность на транспорте, в горных работах и в строительстве может превышать бытовую в 3–5 раз и более. В России, например, в последнее десятилетие многие из показателей индивидуального риска повысились в 1,5–2 раза.

Глобальными антропогенными катастрофами по своим последствиям можно считать крупнейшие войны. Если до начала XX в. в этих войнах вероятность смертей достигала 0,3–0,5 на 1000 жителей, то в Первой мировой войне этот показатель достиг 5, а во Второй − 25 на 1000 жителей.

Для территории стран бывшего СССР уровень риска (смерть от неестественных причин) близок к 10^{-3} ед./год, что на 3–5 порядков превышает нормативный уровень, установленный в странах ЕС.

Таким образом, на протяжении XX в. резко изменились соотношения между рисками природных и техногенных катастроф. Человечеству необходима разработка новой концепции резкого уменьшения рисков и предотвращения чрезвычайных ситуаций от техногенных катастроф и снижения ущерба от природных катастроф.

Накопленная статистика о техногенных катастрофах и анализ основных причин гибели людей и разрушения производственных помещений и жилых комплексов позволяет сделать определенные концептуальные выводы об основных факторах опасности, сопровождающих промышленные аварии и природные катастрофы, обусловленные физическими и химическими процессами, происходящими с веществами и соединениями, вовлеченными в аварию. Основными причинами гибели персонала аварийного технического объекта и людей на территории, прилегающей к нему, являются:

- разрушение зданий и сооружений;
- различные формы пожара (преимущественный фактор поражения – тепловое);
- разлетающиеся осколки и фрагменты оборудования (осколочное поражение);
- падение, столкновение или удар биообъектов с неподвижными элементами конструкций;
- отравление (удушение) газообразными продуктами выброса либо исходных соединений, либо соединений, образовавшихся при химическом превращении в процессе аварии (токсическое поражение);
- прямое поражение ударными или взрывными волнами давления (фугасное поражение).

Как правило, сценарий аварии и ее последствия заданы свойствами веществ, используемых в элементах оборудования, среди которых наиболее важными являются: фазовое состояние (жидкость, газ, двухфазная система); давление; температура; способность к воспламенению и горению; токсичность.

При выбросе токсичного и горючего соединения необходимо рассматривать последствия, обусловленные горением и заражением атмосферы, почвы и воды. При горении некоторых веществ образуются высокотоксичные продукты. Опасные вещества и соединения могут быть сгруппированы по следующим категориям:

• жидкости, хранимые при атмосферных условиях или при давлении и температуре окружающей среды;

• сжиженный газ, хранимый под давлением, но при температуре окружающей среды;

• сжиженный газ, хранимый при атмосферном давлении, но при пониженной температуре;

• сжиженный газ, хранимый под давлением и при пониженной температуре (выброс такого газа сопровождается импульсной фазой быстрого испарения);

• сжатый газ, смесь пара с газом.

При анализе любого сценария аварии необходимо учитывать возможность вовлечения в процесс других источников опасности. Таковыми могут быть соседние хранилища опасных веществ, коммуникации, разрушение которых сопровождается дополнительными очагами поражения. Здесь существенен контроль над плотностью опасных веществ, который задает тип распространения облака в атмосфере: всплывание, осаждение или нейтральное смешение с воздухом. Подобная информация вместе с данными о вероятных источниках поджигания позволяет оценить массу вещества, вовлекаемого во взрывное превращение. На многих технологических установках безопасность обеспечивается установкой клапанов, вентилей, систем аварийного сброса давления и т. п. При этом места наиболее вероятных разрывов достаточно просто идентифицировать. Чаще всего здесь устанавливаются системы сброса давления с учетом того, что горючие вещества не должны истекать через вентиляционные приспособления. Например, при аварийном погасании дежурного факела на башне дожигания попутных горючих продуктов в атмосферу не должны поступать опасные количества горючего или токсичного продукта. При реализации конкретного технологического процесса необходимо исключить или сделать маловероятным развитие нежелательных химических реакций, способных вызвать неконтролируемое повышение давления и температуры.

При утечке опасных веществ из больших резервуаров важно правильно оценить время, в течение которого удается реально изолировать емкость от внешней среды с помощью отсечной аппаратуры. Этот период времени зависит от следующих факторов:

• возможности обнаружения утечки с помощью газовых, температурных и иных детекторов с учетом их размещения и времени быстродействия;

• инерционности действия систем отсечки и изоляции, связанной с наличием автоматизированных или ручных устройств и включающей время активации соответствующих устройств;

• надежности и скорости срабатывания отсечных клапанов и запорных регуляторов.

Можно предполагать, что масштабные разрывы и выбросы опасных веществ обнаруживаются немедленно либо детекторами, либо персоналом. На объектах с неавтоматизированными системами управления время устранения аварийных выбросов зависит от действий операторов, надежности систем оповещения и тренированности персонала и составляет от 3 до 15 минут (с учетом факторов паники, стресса и потенциальных ошибок). Для автоматизированных систем время срабатывания зависит от размеров клапанов и уровня рабочих параметров (в основном давления). Считается, что характерное время срабатывания больших клапанов при высоком давлении составляет около 30 секунд.

В любом случае анализ последствий аварии или построение ее вероятного сценария могут быть существенно упрощены при использовании базы данных по уже случившимся промышленным катастрофам, подвергнутым достаточной экспертизе и описанию. При выборе аналогов самой существенной является общность природы и физико-химических свойств опасного вещества и способов его переработки и хранения. Существующая информация о типичных авариях на продуктопроводах, системах хранения и раздачи горючих веществ позволяет сделать ряд важных практических выводов:

1) основные факторы поражения биообъектов и оборудования обусловлены фугасными и тепловыми эффектами при сгорании парогазовоздушных систем;

2) в незагроможденном пространстве отсутствует фугасный фактор поражения и вся опасность связана с тепловыми потоками при горении, в основном длительностью и интенсивностью теплового излучения;

3) в загроможденном пространстве с размерами более $15\times15\times5$ м^3 можно ожидать быстрые режимы горения с серьезными последствиями от фугасного действия волн давления;

4) погодные условия (температура окружающей среды, сила ветра и т. п.) несущественно влияют на взрывоопасность газовых смесей.

Одна из наиболее важных проблем современного общества – проблема обеспечения безопасности жизнедеятельности как отдельного человека, так и общества в целом. Для этого надо вести теоретические исследования в области безопасности и риска, а также практически разрабатывать возможности анализа, оценки и снижения риска.

Увеличение числа и масштабов техногенных аварий и катастроф обусловлено следующими факторами:

• введением в производство новых технологий, требующих высоких затрат энергии и испарения токсических веществ;

• высоким уровнем износа основных производственных фондов;

• падением технологической и производственной дисциплины, квалификации технологического персонала;

• накоплением отходов производства, представляющих угрозу для окружающей среды;

• снижением требовательности и эффективности работы надзорных органов и государственных инспекций;

• высокой концентрацией населения, проживающего вблизи потенциально опасных территорий.

5.8.2. Безопасность, риск и развитие общества

В начале XX в. управление качеством окружающей среды шло на уровне предприятий и заключалось в издании отдельных указов по регулированию деятельности. В период 1920–1960-х гг. шла разработка правил технологической безопасности и санитарно-гигиенических норм. Появились первые законы в области охраны природы, которые действовали на уровне страны.

До начала 1970-х гг. политика обеспечения безопасности человека и окружающей среды от техногенных факторов была ориентирована на достижение абсолютной безопасности. Любая технологическая опасность независимо от ее значения рассматривалась как чрезмерная, выдвигалось требование об исключении ее из хозяйственной деятельности, т. е. требование о достижении нулевого значения техногенного риска. Это предполагало создание абсолютно безопасных технологий, что и было положено в основу законодательства по промышленной безопасности.

Параметрами безопасности фактически явились не показатели здоровья человека и качества окружающей среды, а некоторые предельные величины (ПДК, ПДВ и т. д.), характеризующие степень надежности технологических систем безопасности.

В начале 1970-х гг. рост использования природных ресурсов и загрязнение окружающей среды привели к тому, что возможности биосферы к самоочищению оказались близкими к исчерпанию. Политика абсолютной безопасности, основанная на принципе «реагировать и выправлять», уступила место новому подходу, основанному на принципе «предвидеть и предупредить». Систему наблюдений за состоянием окружающей среды пришлось дополнить системой, позволяющей с помощью математического моделирования количественно определить риск для окружающей среды от развития той или иной технологии.

Количественными показателями безопасности являются показатели, определяющие состояние здоровья человека и качество окружаю-

щей среды: средняя продолжительность предстоящей жизни человека и степень удаленности состояния экосистем от границ их динамической неустойчивости.

5.8.3. Общая характеристика рисков

Риск (R) − мера количественного измерения опасности, представляющая собой многокомпонентную величину, оцененную с помощью статистических данных или рассчитанную с помощью имитационных моделей, включающих количественные показатели ущерба от воздействия того или иного опасного фактора (U), вероятности возникновения (частоты) рассматриваемого опасного фактора (P) и неопределенности в величинах ущерба и вероятности.

Математически риск можно определить как произведение вероятности неблагоприятного события (аварии, катастрофы и т. д.) и ущерба, ожидаемого в результате этого события: $R = P \times U$.

При анализе опасностей для населения и окружающей среды используют риск, отнесенный к единице времени (за единицу времени чаще всего принимают год).

Существует несколько подходов к классификации рисков.

По причинам возникновения выделяют:

• природные риски − связаны с природными явлениями: землетрясениями, наводнениями, ураганами, оползнями, цунами, вулканической активностью и т. п.;

• техногенные риски − связаны с опасностями, исходящими от технических объектов: авариями, взрывами, пожарами и т. п.;

• биолого-социальные риски − связаны с эпидемиями;

• коммерческие риски − связаны с опасностью потерь в результате финансово-хозяйственной деятельности.

По масштабу:

• индивидуальный риск – учитывает вероятность (частоту) поражения отдельного индивидуума в результате воздействия исследуемых факторов опасности;

• территориальный риск – учитывает пространственное распределение частоты реализации негативного воздействия определенного уровня;

• социальный риск – учитывает зависимость вероятности (или частоты) нежелательных событий, связанных с поражением определенных групп людей, подвергающихся воздействиям определенного вида при реализации соответствующих опасностей, от численности этих групп;

• коллективный риск – учитывает ожидаемое количество смертельно травмированных в результате возможных аварий за определенный период времени.

По месту в теории безопасности и риска:

• приемлемый риск − имеющий уровень, с которым общество готово мириться ради получения определенных благ или выгод в результате своей деятельности;

• неприемлемый риск − имеющий уровень, устанавливаемый административными или регулирующими органами как максимальный, выше которого необходимо принимать меры по его устранению;

• пренебрежимый риск − имеющий уровень индивидуального риска, не вызывающий беспокойства индивидуума (если речь идет об индивидуальном риске). Это также может быть уровень риска, устанавливаемый администрацией предприятия или регулирующими органами как максимально разрешенный, который не приводит к ухудшению экономической деятельности предприятия или качества жизни населения при существующих социально-экономических условиях.

5.8.4. Экологическая безопасность

Экологическая безопасность − состояние защищенности каждого отдельного лица и окружающей среды от чрезмерной экологической опасности.

При штатном функционировании объектов техногенной сферы имеет место ситуация, тем или иным образом предусмотренная и проанализированная проектировщиками и регулирующими органами, выдавшими разрешение (лицензию) на строительство, эксплуатацию (или на снятие с эксплуатации) данного предприятия. Как правило, при этом должен обеспечиваться достаточный уровень безопасности. Возможное воздействие на окружающую среду имеет известную (или лежащую в известных пределах) величину, поэтому к нему можно так или иначе приспособиться.

При этом воздействие опасных факторов носит прогнозируемый характер, имеется достаточно информации и времени, чтобы адекватно отреагировать на наличие такого рода рисков.

Иное положение возникает при отходе от штатной ситуации, особенно если этот отход ведет к развитию аварийного процесса (такие аварии называют запроектными). Следует иметь в виду, что при значительном отклонении от штатных режимов работы многие технические системы попадают в сложные условия работы, и тогда резко возрастает вероятность различного рода отказов, а персонал находится в условиях дефицита времени на принятие решений и высокой нервной нагрузки. При этом возможны различные варианты развития аварийного процесса, значительно возрастают различного рода неопределенности, усиливается синергетический эффект проявления факторов опасности. Особое значение приобретает управление аварией, чтобы направить ход ее развития по возможности в менее опасное русло и тем самым смягчить неблагоприятные последствия.

К основным факторам опасности относят:

• экологически опасные факторы (наводнения, землетрясения, извержения вулканов, цунами и т. д.);

• социально-экономические факторы (обусловлены причинами социального, экономического, психологического характера: недостаточным уровнем питания, здравоохранения, образования, обеспечения материальными благами; нарушенными общественными отношениями; недостаточно развитыми социальными структурами и т. д.);

• техногенные факторы (обусловлены хозяйственной деятельностью людей: чрезмерными выбросами в окружающую среду отходов хозяйственной деятельности в условиях ее нормального функционирования и в аварийных ситуациях; необоснованными отчуждениями территорий под хозяйственную деятельность; чрезмерным вовлечением в хозяйственный оборот природных ресурсов и т. д.);

• военные факторы (обусловлены деятельностью воинских частей и военно-промышленного комплекса: транспортировкой военных материалов и оборудования, испытанием образцов оружия и его уничтожением, функционированием военных объектов и всего комплекса военных средств в случае военных действий).

Все эти факторы во многом взаимосвязаны, поэтому рассматривать их следует комплексно. Например, авария на промышленном предприятии может оказать непосредственное воздействие на здоровье человека. Эта же авария в результате влияния на природные экосистемы может привести к возникновению экологически опасных факторов. Природа этих факторов может быть связана с образованием новых, отсутствовавших до аварии и опасных для человека, химических соединений или с опасными для человека видовыми и структурными изменениями в экосистемах. Кроме того, опасные вещества, попавшие при аварии в окружающую среду, могут проникнуть в организм человека из воздуха, с водой или продуктами питания. Также возможно появление опасных социально-экономических и даже военных факторов, обусловленных происшедшей аварией.

На основе анализа последствий и периодичности природно-техногенных аварий и катастроф можно выделить их следующие классы: планетарные, глобальные, национальные, региональные, местные, объектовые.

Планетарные катастрофы с возможностью гибели жизни на Земле связываются с такими катастрофическими природными явлениями, как столкновение Земли с крупными астероидами, имеющими скорости движения до 80 км/сек, а также с полномасштабными военными действиями с применением современного ядерного, термоядерного и химического оружия массового поражения.

Глобальные катастрофы могут затрагивать территории ряда сопредельных стран; периодичность таких катастроф оценивается

в 30–40 лет и более, число пострадавших в них будет достигать более 100 тыс., а экономический ущерб может превышать 100 млрд долларов. Такие последствия связываются с крупномасштабными техногенными катастрофами на ядерных реакторах гражданского и военного назначения с расплавлением активной зоны, на предприятиях ядерного цикла, на ядерных боеголовках, на мощных ракетах-носителях, на атомных подводных лодках и надводных судах, на складах с химическим оружием и на крупных химических предприятиях с большими запасами сильнодействующих ядовитых отравляющих веществ. К природным катастрофам с глобальными последствиями можно отнести крупнейшие землетрясения, извержения вулканов, цунами, ураганы.

Национальные катастрофы затрагивают территории отдельных стран. Их периодичность составляет 15–20 лет. Число жертв и пострадавших – не менее 10 тыс. человек, а экономический ущерб достигает 10 млрд долларов и более. Такие катастрофы могут возникать на указанных выше объектах, а также при транспортировках больших масс людей и опасных грузов, на пересечениях магистральных трубопроводных систем с транспортными линиями и линиями электропередач, при пожарах на крупнейших промышленных и гражданских комплексах, при падениях самолетов на опасные объекты, при разрушениях крупных плотин и дамб. К опасным природным процессам с последствиями национального масштаба относятся землетрясения, ураганы, наводнения, лесные пожары, селевые потоки и др.

Природные и техногенные *катастрофы регионального масштаба* захватывают территории целых республик, краев и областей; их периодичность составляет 10–15 лет. Число жертв и пострадавших в них может превышать 1000 человек, а экономический ущерб – 1,0 млрд долларов. Такого рода катастрофы вызываются теми же причинами и приводят к тем же последствиям, что и национальные катастрофы. Дополнительно к ним можно отнести взрывы и пожары на объектах с опасными веществами, при крушениях поездов, судов и самолетов, при взрывах на металлургических комплексах, элеваторах, шахтах. Дополнительными опасными природными процессами являются обвалы, ливни, оползни, снежные лавины, горные удары.

Локальные (местные) аварии и катастрофы создают ущерб для городов и районов. Частота их возникновения существенно выше – менее одного года; пострадавшими в них оказываются сотни людей, а экономический ущерб достигает 100 млн долларов. Спектр основных причин и источников локальных аварий и катастроф дополняется обрушениями и пожарами на промышленных и гражданских сооружениях, при локальных выбросах радиоактивных и отравляющих веществ.

Объектовые аварии и катастрофы ограничиваются территориями санитарно-защитных зон объекта. Частота таких аварий и ка-

тастроф характеризуется временем до одного месяца. Число жертв и пострадавших находится на уровне десятков, а экономический ущерб – на уровне миллиона долларов. Наиболее частыми здесь являются пожары, взрывы, столкновения и крушения транспортных средств, обрушения, провалы.

Такая классификация аварий и катастроф в природно-техногенной сфере позволяет более ориентированно вести разработку методов и систем их анализа, прогнозирования и предотвращения.

5.8.5. Экологические риски

Экологическим называется риск, связанный с изменениями в окружающей среде. Этот вид риска применяется для оценки экологических последствий аварий, катастроф природного и антропогенного характера и т. д. Рассмотрим риск при авариях на опасных для здоровья человека объектах и риск воздействия ионизирующего излучения.

Типичный пример кратковременного, залпового воздействия на окружающую среду крайне интенсивного неблагоприятного фактора − авария на химическом предприятии. Сформировавшееся после разрушения емкости с сильнодействующим ядовитым веществом (СДЯВ) облако будет распространяться по направлению ветра, постепенно рассеиваясь по мере удаления от эпицентра аварии. По достижении некоторого расстояния от эпицентра концентрация СДЯВ в воздухе снизится настолько, что уже не будет представлять угрозы для жизни и здоровья людей. Расстояние от эпицентра аварии до указанной точки обычно называют *глубиной зоны поражения.* Число пораженных облаком СДЯВ будет зависеть от плотности населения на прилегающей к предприятию территории, глубины и площади зоны, внутри которой концентрация СДЯВ будет превышать порог поражения, а также времени, в течение которого ядовитое облако будет «нависать» над территорией. Глубина и площадь зоны зависят от природы и массы СДЯВ, выброшенного в окружающую среду, характера разлива и погодного состояния (скорости ветра, температуры воздуха, облачности и т. д.) в момент аварии.

Оценка потенциального территориального риска поражения населения сводится к оценке вероятности оказаться под действием ядовитого облака для любой точки территории и к оценке распределения вероятного ущерба (числа или доли пораженных).

Для оценки риска учитывают зону фактического заражения (замкнутый участок территории с концентрацией СДЯВ в приземном слое атмосферы, не превышающей порог острого отравления) и зону возможного заражения (зону, за пределы которой с вероятностью 95 % не выйдет облако с поражающей концентрацией СДЯВ).

Количество пораженных зависит от площади зоны заражения и времени воздействия ядовитого облака на людей. Площадь зоны заражения и время испарения разлитого СДЯВ − функции погодного состояния. Время экспозиции принимают равным времени испарения. Расчет начинают с вычисления площади зоны заражения и времени экспозиции, которые соответствуют разным погодным состояниям. Долю пораженных от общего числа населения при возникновении конкретной аварии, соответствующей определенному погодному состоянию, рассчитывают по статистическим данным.

К физическим экологически опасным факторам относят ионизирующее излучение. Органы и ткани человеческого тела обладают различной чувствительностью к ионизирующему излучению. Например, при равной эквивалентной дозе облучения возникновение злокачественных опухолей в легких более вероятно, чем в мышечной ткани. Поэтому дозу каждого облученного органа учитывают с различными поправочными (взвешивающими) коэффициентами. Сумма доз для каждого органа, умноженная на соответствующий поправочный коэффициент, называется эффективной дозой (как мера риска возникновения отдаленных последствий облучения всего тела человека и отдельных его органов с учетом их радиочувствительности). Эта величина характеризует уровень биологического эффекта ионизирующего излучения. Эффективная доза измеряется в зивертах. Для характеристики дозы, полученной группой людей, индивидуальные эффективные дозы суммируются. Рассчитанная подобным образом доза называется к*оллективной эффективной дозой* и измеряется в человеко-зивертах (чел.-Зв).

Действие ионизирующего излучения на организм человека может быть острым (лучевая болезнь) либо проявляться в форме увеличения риска отдаленных последствий, как правило, онкологических и генетических. Острое действие ионизирующего излучения относят к детерминированным эффектам излучения, в отношении которых предполагается существование порога, выше которого тяжесть эффекта не зависит от дозы. Отдаленные последствия относят к стохастическим последствиям излучения − вредным биологическим эффектам излучения, не имеющим дозового порога. Предполагается, что вероятность возникновения этих эффектов пропорциональна дозе, а тяжесть их проявления не зависит от дозы.

Совокупность неблагоприятных эффектов излучения лежит в основе радиационного риска − вероятности того, что в результате облучения у человека возникает какой-либо конкретный вредный эффект. Вероятность реализации отдаленных последствий меняется со временем − сначала риск раковых заболеваний нарастает до максимального значения, а затем наблюдается снижение заболеваемости.

5.8.6. Управление риском

Безопасность означает существование в условиях приемлемого или пренебрежимого риска. Такой подход позволяет количественно оценивать уровень безопасности и разрабатывать методы управления безопасностью, устанавливая тем или иным способом уровень приемлемости риска в конкретных условиях и вырабатывая меры по его обеспечению. Под приемлемым в данном контексте понимается риск, оправданный с точки зрения экономических и социальных факторов.

Чтобы определиться с уровнем приемлемого риска, необходимо выбрать метод принятия решений и целевую функцию, максимизация (или минимизация) которой в рамках выбранного метода принятия решений может служить критерием правильности (или удовлетворительности) принятого решения.

Выбор такой целевой функции может носить достаточно условный характер, например, путем установления уровня индивидуального риска, превышение которого не допускается законодательно.

Политика в области управления риском (безопасностью) должна предусматривать действия в четырех согласованных направлениях:

- разработка системы соответствующих целей политики, критериев и показателей, определяющих степень достижения этих целей;
- разработка, совершенствование и внедрение методов управления и достижения поставленных целей, критериев и показателей;
- разработка системы законодательства и системы государственно-территориального управления безопасностью населения и окружающей среды;
- разработка стратегии поэтапного решения проблем, связанных с трансграничными переносами опасностей и глобальным воздействием на природу и население Земли.

В Конституции Республики Беларусь говорится, что человек, его права, свободы и гарантии их реализации являются высшей ценностью и целью общества и государства, для обеспечения безопасности жизни и здоровья работников в процессе трудовой деятельности действует система охраны труда. Следовательно, основным принципом государственной политики Беларуси в управлении риском является обеспечение приоритета жизни и здоровья работников по отношению к результатам трудовой деятельности. Актуальность проблемы безопасного труда определяется высоким уровнем смертности и травматизма на производстве, числом и тяжестью профессиональных заболеваний, количеством производственных аварий.

Все мероприятия по устранению или снижению уровня риска по характеру воздействия на компоненты риска подразделяют на:

• предупреждающие – снижают вероятность поступления опасного события и нанесения вреда здоровью работающему, но не влияют на тяжесть возможных последствий;

• защитные – снижают тяжесть возможных последствий, но не влияют на вероятность их наступления.

В зависимости от того, какая составляющая риска (вероятность наступления опасного события и нанесения вреда здоровью или тяжесть вреда) превалирует, в предлагаемых мероприятиях соответственно должны преобладать предупреждающие либо защитные мероприятия.

Меры управления неприемлемыми рисками:

• относящиеся к объектам (например, модернизация/замена опасного оборудования, технологии, установка блокировочных и предохранительных устройств, улучшение состояния полов и рабочих поверхностей, перил и ограждений, электрическая защита оборудования);

• относящиеся к процедурам (например, новые методы безопасного проведения работ и эксплуатации объектов, включение вида деятельности в перечни работ с повышенной опасностью, работ, выполняемых по наряду-допуску, разработка руководств по эксплуатации, рабочих инструкций, проектов производства работ, технологических карт, процедуры по ликвидации проливов и нейтрализации агрессивных жидкостей, процедуры реагирования в аварийных ситуациях, предотвращения несчастных случаев);

• относящиеся к людям (например, дополнительное обучение, инструктаж, стажировка, учебно-тренировочные занятия, повышение квалификации, усиление контроля выполнения работы).

Управление риском – разработка и реализация оптимальных программ деятельности, призванных эффективно реализовать решения в области обеспечения безопасности. Главное в такой деятельности – оптимальное распределение ограниченных ресурсов с целью снижения различных видов риска для достижения максимального уровня безопасности населения и окружающей среды с учетом экономических и социальных факторов.

И. И. Кузьмин с соавторами [3], изучив множество материалов по безопасности и риску, выделили четыре принципа управления риском:

1. Принцип оптимизации соотношений выгоды и ущерба. Стратегическая цель управления риском – стремление к повышению уровня благосостояния общества при условии, что никакая практическая деятельность, направленная на реализацию цели, не может быть оправдана, если выгода от нее для общества в целом не превышает вызываемого ею ущерба. Этот принцип объединяет два фундаментальных утверждения:

1) ценность любой практической деятельности в первую очередь определяется ее полезностью для общества в целом, т. е. ее способностью повысить уровень благосостояния общества;

2) только учет всех плюсов и минусов (выгоды и ущерба) любой деятельности может дать ответ на вопрос о ее полезности.

В этом принципе авторы выделяют три подпринципа:

• деятельность, при которой отдельные индивидуумы подвергаются чрезмерному риску, не может быть оправдана, даже если она выгодна для общества в целом;

• члены общества добровольно соглашаются на наличие в их жизни определенного, не превышающего чрезмерного уровня риска от той или иной деятельности, внедрение которой требуется для удовлетворения их материальных и духовных потребностей;

• должны быть предприняты все возможные меры для защиты каждой личности от чрезмерного риска. Затраты на эти меры (денежные компенсации, перемещения населения, создание защитных барьеров и т. д.) включаются в общую сумму затрат на данный проект или вид деятельности и, таким образом, учитываются при оценке полезности реализации данного проекта или вида деятельности для общества в целом. При выборе конкретных мер защиты от чрезмерного риска необходимо обязательно учитывать мнение индивидуума, нуждающегося в такой защите.

Под чрезмерным понимают такой уровень индивидуального риска, который превышает предельно допустимый уровень риска для индивида.

2. Принцип оптимизации защиты от опасности. Направлен на решение задачи распределения ограниченных материальных ресурсов, снижение риска от тех или иных видов опасности, воздействию которых могут быть подвержены человек и окружающая среда.

Согласно этому принципу, в процессе управления риском требуется определить такую величину затрат на меры безопасности в рассматриваемой деятельности, которая бы обеспечила максимально возможное увеличение средней ожидаемой продолжительности жизни (СОПЖ) в данной социально-экономической системе. В рамках такого процесса управления риском должна быть определена конкретная количественная величина приемлемого риска от того или иного вида деятельности.

Данный принцип включает в себя подпринцип: максимизация СОПЖ в целом для общества не должна происходить за счет отдельных членов общества. Практическая реализация этого подпринципа сводится к уменьшению риска для общества в целом с обязательным условием соблюдения неравенства между его членами методом компенсации, если можно определить заранее, кто именно в силу тех или иных обсто-

ятельств (профессиональной деятельности на опасных производствах или проживания вблизи предприятий с повышенным уровнем риска) подвергается повышенному уровню риска. Этому лицу должна выплачиваться компенсация, соответствующая величине риска.

На основе принятого уровня приемлемой безопасности должны определяться затраты на модернизацию старых объектов, строительство новых объектов и вообще все затраты на предотвращение ущерба (содержание различных органов, государственных, местных, включая аварийно-спасательные службы, мониторинг и т. д.), а также затраты на компенсацию: расчеты платы за ущерб в разной форме, включая страхование, платы за трансрегиональный ущерб и т. д.

3. Принцип региональности. В управление риском должен быть включен весь совокупный спектр существующих в регионе опасностей, а вся информация о принимаемых решениях в этой области должна быть доступна самым широким слоям населения. Некоторые страны (США, Нидерланды, Швейцария и др.) уже провели специальные исследования по оценке совокупного риска индивидуума и населения в целом, проживающих в крупных промышленных регионах этих стран, и внимание органов, принимающих решения в области риска, привлечено к необходимости уделить и разработать унифицированную политику безопасности, установить унифицированную систематическую и интегральную методологию принятия решений по уменьшению риска в умышленных районах, основанную на принципе оптимального распределения средств на ее снижение с учетом сложных и многочисленных целей соответствующего процесса принятия решений. Создание общей политики безопасности, основанной на концепции приемлемого риска и интегральной региональной методике его стечения, идет в странах ЕС.

4. Принцип экологического императива. Политика в области управления риском должна реализовываться в рамках строгих ограничений техногенного воздействия на природные экосистемы. Принцип экологического императива говорит о том, что экономика должна удовлетворять нужды и законные желания каждого человека и общества в целом в условиях повышения безопасности. Практическая реализация этого принципа возможна только в случае, если используется система индикаторов состояния окружающей среды и сформированная на ее основе совокупность показателей, которые бы количественно и на научной основе определяли состояние защищенности (безопасности) этой среды.

Анализ риска представляет собой один из существенных компонентов управления риском и проводится для выявления отдельных источ-

ников опасности и оценки их потенциального влияния на возможные ущербы, которые могут быть причинены населению, окружающей среде и хозяйственным объектам. Возможность ущерба обычно вызывается цепочкой связанных причинных факторов, приводящих к определенным последствиям, и анализ риска необходимо проводить для каждого элемента такой цепочки и для всех возможных исходных событий, в том числе и маловероятных. Определив набор возможных исходных событий, на следующем шаге надо проследить связи между исходными событиями и их последствиями. При этом следует убедиться, что выявлены все возможные воздействия и их последствия, а не только те, которые имели место прежде. Анализ риска – это комплексная задача, требующая от лиц, занимающихся управлением риском (так называемых риск-менеджеров), и соответствующих управляющих структур значительных усилий и большого объема работ.

Прежде чем приступать к идентификации отдельных источников опасности и оценивать риск, связанный с такими источниками, необходимо получить соответствующую исходную информацию, которая может быть добыта различными способами. Чаще всего для ее получения используют стандартизированный опросный лист, диаграммы организационной структуры органов управления и предприятий, карты потоков, отражающие технологические потоки производственных процессов, персональные инспекционные посещения потенциально опасных объектов, консультации со специалистами. После выявления принципиально возможных рисков необходимо оценить их уровень и последствия, к которым они могут привести, т. е. вероятность соответствующих событий и связанный с ними потенциальный ущерб.

Список литературы

1. *Акимов, В. А.* Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах: учебное пособие / В. А. Акимов, В. В. Лесных, Н. Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004. – 352 с.

2. *Гершензон, В. Е.* Информационные технологии в управлении качеством среды обитания: учебное пособие для студентов высших педагогических учебных заведений / В. Е. Гершензон, Е. В. Смирнова, В. В. Элиас; под ред. В. Е. Гершензона. – М.: Академия, 2003. – 288 с.

3. *Кузьмин, И. И.* Безопасность и риск: эколого-экономические аспекты / И. И. Кузьмин, Н. А. Махутов, С. В. Хетагуров. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. гос. ун-та экономики и финансов, 1997. – 163 с.

5.9. Примеры математических моделей сложных объектов

5.9.1. Физически «безопасный» ядерный реактор

Ядерная энергетика служит одной из основ индустрии многих развитых стран, занимая в ряде из них первое, в сравнении с другими видами энергетики, место по выработке электроэнергии. Проблемы ее безопасности сложны и разнообразны: захоронение отходов и уменьшение потребности в добыче урана, эффективное использование обедненного и освобождающегося при ядерном разоружении урана, предотвращение тяжелых аварий на реакторах.

В реакторах любого типа определяющими физическими процессами являются нейтронно-ядерные реакции, приводящие к выделению энергии в его активной зоне, и отвод от этой зоны тепла, используемого затем для получения электроэнергии. Работающий реактор поддерживается в критическом состоянии, когда число выделяющихся нейтронов таково, что вырабатываемая мощность практически не зависит от времени. В подкритическом режиме нейтронов появляется меньше, чем теряется, и реакция деления быстро затухает. В надкритическом состоянии, наоборот, нейтронный выход слишком велик, и это может привести к разогреву и «взрыву» активной зоны.

В обычных реакторах критическое состояние физически неустойчиво, оно поддерживается искусственно с помощью очень сложной системы управления. Без такой системы происходит выход либо на подкритический, либо на надкритический режимы. Реактор делается с запасом реактивности (надкритичность), который компенсируется введением в активную зону специальных стержней, поглощающих «лишние» нейтроны. Если же по мере выгорания топлива реактивность уменьшается, то управляющие стержни частично выводятся из системы и нейтронный поток вырастает до величины, необходимой для плановой работы реактора.

Характерное время отклонения от критического состояния определяется в основном периодом запаздывающих нейтронов, т. е. нейтронов, выделяющихся из осколков деления лишь некоторое время спустя после реакции распада. Этот период менее одной минуты, что предъявляет весьма жесткие требования к системе управления. Именно за это короткое время она должна «принять» и реализовать соответствующее решение при возникновении непредвиденных ситуаций.

Главная идея физически безопасного реактора – компоненты топлива должны быть подобраны так, чтобы, во-первых, его характерное время было заметно больше минуты, во-вторых, чтобы в режиме его работы появились элементы саморегулирования.

Этого можно достичь, если в реакторе среди прочих реакций будет достаточно заметной следующая цепочка превращений:

$$^{238}\mathrm{U} + \mathrm{n} \longrightarrow {}^{239}\mathrm{U} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}\mathrm{Np} \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}\mathrm{Pu},$$

где через ^{238}U, ^{239}U, ^{239}Np, ^{239}Pu обозначены соответствующие изотопы урана, нептуния и плутония, символом n – нейтрон, символ β^- означает бета-распад (испускание электрона ядром). В этом случае образующийся в результате плутоний является основным и используемым сразу топливом. Характерное время такой реакции – время двух бета-распадов, равное приблизительно 2,5 суткам, т. е. оно почти на четыре порядка больше, чем для запаздывающих нейтронов.

Эффект саморегуляции связан с тем, что увеличение (по каким-то причинам) потока нейтронов приведет к быстрому выгоранию плутония, уменьшению его концентрации и, соответственно, потока нейтронов (образование же новых ядер ^{239}Pu будет идти в прежнем темпе примерно в течение 2,5 суток). Если же, наоборот, поток нейтронов в результате внешнего вмешательства резко уменьшится, то уменьшится скорость выгорания и увеличится темп наработки плутония с последующим увеличением числа выделяющихся в реакторе нейтронов через приблизительно такое же (равное нескольким суткам) время.

Описанные превращения протекают и в традиционных реакторах, однако в них они являются второстепенными для энерговыделения, поскольку используются в основном для накопления плутония. Ответ на вопрос, существует ли такая смесь U и Pu, при которой данная реакция становится доминирующей, может быть получен только с помощью математического моделирования этой сложнейшей системы.

Достаточно полная математическая модель активной зоны реактора должна включать в себя модели нестационарных пространственно трехмерных процессов переноса нейтронов в сильно неоднородной среде, выгорания топлива и реакторной кинетики, а также модель отвода тепла.

Однако для проверки осуществимости выдвинутой физической идеи, причем с хорошей количественной точностью, можно ограничиться более простой моделью. Первое упрощение – раздельный анализ нейтронно-ядерных процессов и процесса теплоотвода (оно оправдано при больших временах регулирования). Собственно нейтронные процессы вполне допустимо изучать не в трехмерной, а в одномерной геометрии, рассматривая их к тому же в диффузионном и одногрупповом приближении (последнее означает, что соответствующим образом осредняются спектральные характеристики нейтронов).

Получающиеся при этих упрощениях уравнения переноса нейтронов по своему типу в некотором смысле близки к уравнениям теплопередачи. Они решаются совместно с уравнениями реакторной кинетики

для шести групп предшественников запаздывающих нейтронов (уравнения типа радиоактивного распада, но с учетом «источников» нейтронов) и уравнениями выгорания для почти двадцати типов изотопов *U*, *Pu*, *Np* и других элементов. Разделение этих трех моделей невозможно, поскольку большинство искомых величин фигурирует во всех уравнениях. Метод решения – полудискретная (пространственная) аппроксимация исходной модели с последующим численным интегрированием по времени получающейся сложной системы обыкновенных дифференциальных уравнений высокой размерности.

Типичный вычислительный эксперимент состоит в задании начальной критической сборки (т. е. смеси веществ и геометрии активной зоны таких, чтобы получившийся реактор был критическим) и изучении эволюции со временем основных характеристик реактора. Заметим, что начальная сборка находится с помощью специального предварительного вычислительного эксперимента.

Один из вариантов сборки в цилиндрической геометрии:

Зона 1	Зона 2
^{239}Pu – 8 % ^{238}U – 92 % Сталь *Na*	Обедненный природный уран (^{235}U – 0,33 %, ^{238}U – 99,77 %) Сталь *Na*
r_1 = 89,48 см	r_2 = 200 см

Сборка разбита на две зоны разных размеров с различным содержанием плутония и изотопов урана (присутствие в гомогенной смеси натрия соответствует наличию теплоносителя, сталь соответствует конструкционным элементам).

Эксперименты с моделью отвечают и на вопрос об устойчивости реактора к сильным возмущениям (авариям). Например, возможен выброс части теплоносителя (натрия) из активной зоны в результате самопроизвольного или насильственного разрыва оболочки трубопровода. На рисунке 44 приведена зависимость величины λ от времени после подобной аварии. Она моделировалась следующим образом: в момент t = 63 сут. из первой зоны в интервале $0 \le r \le 15{,}4$ см за 15 мин с постоянной скоростью был выведен весь натрий. Это привело к возникновению колебаний характерного времени (при этом его минимальное значение составляло 8 мин, что вполне достаточно для реальной коррекции работы реактора). В дальнейшем возникшее возмущение гасится самим реактором без какого-либо внешнего воздействия (саморегулировка), и через 32 ч его характерное время стабилизируется, становясь равным, как и прежде, примерно 10 сут. Эксперименты с моделью обосновывают также и некоторые другие преимущества рассматриваемого реактора, например, нет необходимости добавлять в ак-

тивную зону новые порции плутония взамен выгоревшего (поэтому нет нужды в транспортировке и иных манипуляциях с одной из основных компонент ядерного оружия).

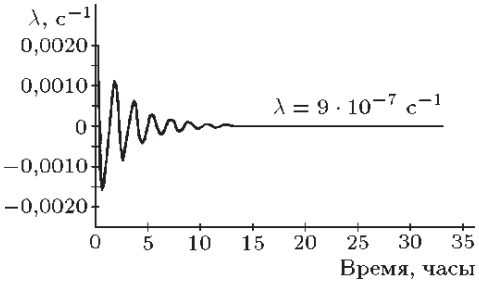


Рис. 44. **Динамика характеристики времени отклонения от критичности для рассматриваемого двухзонного реактора**

Таким образом, математическое моделирование и вычислительный эксперимент позволяют не только качественно, но и количественно изучать один из перспективных способов повышения безопасности ядерной энергетики.

5.9.2. Гидрологический «барьер» против загрязнения грунтовых вод

Снабжение крупных городов и промышленных центров доброкачественной водой для питья и водой для технических нужд давно стало острой техно-экологической проблемой. Для ее решения помимо открытых и потому легко загрязняемых источников (реки, озера, водохранилища) активно используются подземные воды влагосодержащих пластов. Они менее подвержены антропогенным воздействиям, однако и для них вопросы, связанные с зачастую неизбежным загрязнением, остаются актуальными. Один из них – локализация вредных примесей, проникающих в часть пласта с тем, чтобы вода в других частях оставалась чистой и пригодной для потребления.

Эту цель можно достичь, используя часть грунтовых вод для создания на пути распространения загрязнений своеобразного гидрологического барьера. Общая его схема показана на рисунке 45: между источником загрязнения (звездочки) и водозаборными скважинами устанавливаются специальные скважины, накачивающие (достаточно чистую) воду в пласт и повышающие ее уровень (барьер). Накачка создает принудительное движение грунтовых вод вправо и влево от барьера

(стрелки). Фильтрующаяся направо часть потока сносит назад текущую ей навстречу воду с примесями, препятствуя дальнейшему продвижению загрязнений вдоль пласта. Вид сверху на пласт изображен в правой части рисунка.

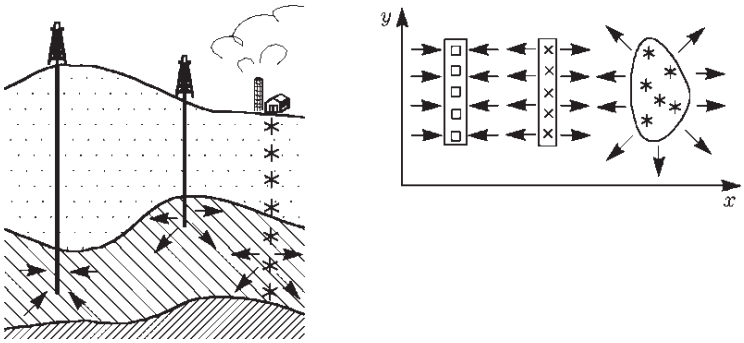


Рис. 45. **Схема гидрологического барьера**

Математическая модель, реализующая эту схему, содержит уравнения фильтрации грунтовых вод и уравнения распространения примесей, дополненные соответствующими входными данными (свойствами грунта, воды и примесей, сведениями о геометрии рассматриваемой области, краевыми условиями и т. д.). При относительно небольшом содержании примесей в воде они не оказывают на ее движение заметного влияния, поэтому фильтрацию можно рассматривать отдельно от динамики распространения загрязнений. При некоторых допущениях, главным из которых является предположение о достаточной протяженности пласта, движение воды описывается в рамках модели Буссинеска.

Окончательный ответ о целесообразности гидрологического барьера может быть получен лишь после дополнительных исследований по моделированию изучаемых процессов, в том числе с учетом свойств конкретных грунтов, различных способов расположения скважин, экономических аспектов и т. д. Очевидно, что те или иные решения рассматриваемой проблемы должны опираться на математическое моделирование и вычислительный эксперимент, поскольку масштабы явления исключают натурные эксперименты, а лабораторные испытания в силу отсутствия подобия дают лишь ограниченную информацию.

5.9.3. Экологически приемлемые технологии сжигания углеводородного топлива

Большая часть используемой в промышленности и быту энергии производится в топочно-сжигающих устройствах – котлах ТЭЦ, газовых

турбинах, двигателях внутреннего сгорания и т. д. Химическая энергия сжигаемых в воздухе углеводородов (бензин, керосин, мазут, метан) либо реализуется непосредственно для обогрева, либо преобразуется в механическую или электрическую энергию. Общее свойство всех этих процессов заключается в том, что воздух содержит не только кислород (окислитель), но и заметную долю «побочного» вещества – азота. С участием последнего в процессе горения образуются соединения, которые, в отличие от нейтрального азота, химически активны (главные из них – оксиды азота NO и NO_2). Вред от попадания оксидов в атмосферу разнообразен: они служат главным источником возникновения кислотных дождей, существенно способствуют истончению озонового слоя атмосферы, токсичны для дыхания и т. д.

Обычно используют два метода снижения выбросов оксидов азота. Первый из них – очистка продуктов горения. Соответствующее оборудование весьма эффективное, но и очень дорогое. Стоимость современных фильтров достигает до 10–30 % от стоимости самой ТЭЦ, в такой же пропорции увеличиваются расходы на ее текущую эксплуатацию. Основная идея второго метода – организация процесса горения таким способом, при котором образование оксидов азота было бы минимальным при сохранении энергетических характеристик установки. Осуществление этого подхода означало бы заметное снижение затрат на газоочистку продуктов горения от NO и NO_2 (полностью подавить их образование нельзя).

Происходящие в топочных устройствах процессы очень сложные. В них происходит множество химических превращений большого числа различных веществ, выделение и поглощение энергии, газодинамическое движение смесей, турбулентное перемешивание компонент горючего с воздухом и продуктами горения и т. д. Динамика этих явлений сильно зависит от режима подачи топлива, конфигурации котлов, расположения горелок и других характеристик топок. Поэтому поиск экологически допустимых режимов их работы не может опираться ни на чисто теоретические представления, ни на натурные эксперименты – дорогие, длительные и небезопасные.

Удовлетворительная по своей полноте математическая модель работы котла ТЭЦ включает в себя две взаимосвязанные части. Первая из них – локальное описание химической кинетики для 32 компонент смеси, в особенности тех реакций, которые играют наибольшую роль в образовании токсичных загрязнителей. Вторая часть – нестационарная пространственно двумерная модель макропроцессов тепломассопереноса (диффузия веществ, теплопередача, конвективное движение и т. д.). Она осложняется также необходимостью учета реальной геометрии котла (П-образная форма), наличием в нем нескольких ярусов горелок, служащих для впрыскивания топлива и воздуха, и другими

факторами. Из вычислительных экспериментов с такой моделью находятся все необходимые характеристики горения при различных режимах работы котла и отбираются оптимальные.

Охарактеризуем один из фрагментов математического моделирования описанных явлений, ограничившись первой частью – исследованием кинетики образования NO и NO_2 при горении CH_4 (метана), смешанного с воздухом (смесь считается изотермической и пространственно однородной). Полная модель включает в себя 196 прямых и столько же обратных реакций для 32 участвующих в горении веществ: O_2, N_2, CH_4, O, N, NO, NO_2 и т. д. В математическом отношении она представляет собой систему из $196 \times 2 = 392$ обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих прибыль и убыль компонент в результате соответствующих прямых и обратных реакций. Интегрирование ее по времени при известных начальных концентрациях веществ дает подробную динамику процесса. При этом прослеживаются не только суммарная концентрация того или иного вещества, но и все пути его образования, что особенно важно для анализа механизмов появления токсичных примесей (один из эффективных методических приемов, облегчающих расчеты: по результатам пробных вычислений отмечаются реакции, вносящие незначительный вклад в процесс и поэтому впоследствии в модели не учитываемые).

Опишем один из типичных вычислительных экспериментов, проводившихся в близких к реальным условиям. Смесь находится при атмосферном давлении, ее температура равна 2000 К, а начальный состав в момент $t = 0$ задается в следующих долях: $[N_2] \approx 0{,}7$, $[O_2] \approx 0{,}2$, $[CH_4] \approx 0{,}1$. Расчет проводился до установления равновесия, т. е. до тех пор, когда концентрация любой из компонент перестает изменяться.

В данном эксперименте итоговая концентрация NO на много порядков превышает концентрацию других вредных примесей. Поэтому основное внимание должно быть направлено на уменьшение именно этой компоненты. Существенно также то, что содержание NO монотонно увеличивается со временем. Значит, проблему уменьшения выхода NO проще решать, подавляя его образование (если же NO уже образовался, то обеспечить его исчезновение гораздо труднее).

Кроме того, к моменту, когда горение метана практически закончилось, в смеси присутствует лишь 13 % от общего количества образующегося в итоге NO (основная часть вредных примесей появляется после того, как уже завершились энергетически полезные реакции сжигания метана).

Сильная временная разномасштабность этих двух процессов указывает на одну из принципиальных возможностей существенного уменьшения NO в продуктах горения. Необходимо как можно быстрее (в идеале сразу же после выгорания метана) удалить продукты горения

из зоны пламени и резко охладить. В результате дальнейшие химические превращения, в том числе и образование NO, прекратятся, причем без потери энергетической мощности установки.

Следует обратить внимание на ряд других важных свойств процесса. Например, выход NO монотонно уменьшается при снижении температуры горения, выход закиси азота N_2O (озоноразрушающее вещество) заметен лишь на промежуточных стадиях процесса, в дальнейшем она превращается в безвредный N_2, и т. д. Эти выводы очень полезны для выработки рекомендаций по конструированию экологически приемлемых энергетических установок.

Список литературы

1. *Самарский, А. А* Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 320 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ[1]

Много лет назад, будучи студентом-зоологом, я обратил внимание на то, что в результате полевых исследований собирается огромный объем данных, но в конце концов изучаемое нами явление описывается лишь таблицами средних значений. Такая ситуация показалась мне крайне несправедливой как по отношению к моему труду, так и по отношению к диким животным, которых зоолог вынужден уничтожать для своих исследований.

С другой стороны, мой учитель, упорядочивая множество данных учета численности мышевидных грызунов или птиц, применял четкую логическую процедуру. На библиотечных карточках он в одной и той же последовательности записывал виды и их численность. Виды он раскрашивал в зависимости от численности в три цвета. Каждая карточка содержала информацию об одном учете или местообитании. Затем на большом столе раскладывал, как он говорил, «пасьянс», в котором упорядочивал карточки по сходству цветовой разметки. Проведя такую классификацию, он сравнивал полученные классы с аналогичным образом упорядоченными характеристиками среды и в наглядной форме устанавливал связи между численностью отдельных видов и средой.

Сама процедура пасьянса была очень увлекательна. Она требовала нескольких последовательных перекладываний (итераций). Конечный результат не всегда был строго однозначным. В нем часто сохранялась некоторая неопределенность: какую-то карточку в равной степени можно было отнести к двум разным хорошо отличимым подмножествам. Однако обычно «природа» демонстрировала стремление к некоторому порядку. При всем этом процедура, подчиняясь с полной очевидностью определенному правилу, занимала много времени. Вместе с тем было очевидно, что чисто логически задача взаимоупорядочивания данных разрешима только при относительно небольшом объеме наблюдений.

В то время «узкой специализации», будучи убежденным биологом, я считал себя полностью независимым от математики и не очень утруждался ее изучением. Однако поиск путей устранения очевидных для меня противоречий между «объемом данных и содержанием результатов», практически полной алгоритмизацией процедуры упорядочивания данных и необходимостью ручного перебора, сложность которого экспоненциально увеличивалась с увеличением объема выборки, заставили меня искать их разрешения в области математических методов.

[1] Выдержка из учебного пособия Ю. Г. Пузаченко «Математические методы в экологических и географических исследованиях» (М.: Академия, 2004. – 416 с.)

Обратившись к учебнику «Биометрия» Н. А. Плохинского, я с первой страницы столкнулся с проблемами. Попытка понять смысл дисперсии и среднеквадратического отклонения вызвала большие проблемы, а распределение и действующие в нем законы полностью убедили в том, что либо я что-то не понимаю, либо в учебнике упущены какие-то содержательные вещи, без которых невозможно уяснить смысл всех последующих действий. Как показала практика, скорее всего, справедливым оказалось последнее. В то время учебники прикладной статистики в основном сводились к описанию правил действий, и места для рассмотрения их смысла не оставалось. Учебники были написаны по принципу «делай как я, и будет хорошо».

Все-таки после месяца усилий, приложенных к первым десяти страницам, я понял, о чем идет речь, и стал довольно бойко разбирать более сложные операции. Однако результаты классической статистики меня не удовлетворили. Почти вся статистика того времени сводилась к проверке альтернативных гипотез, сравнению средних и расчету коэффициента корреляции как меры отношений между двумя переменными. При этом детали этих отношений в расчет не принимались.

Исследование отношений между свойствами среды и свойствами какого-либо вида животных или растений – важнейшая цель полевого эколога. Классические методы статистики в большинстве своем не очень пригодны для решения такого рода задач. В то время они в большей степени были ориентированы на проверку отклика на воздействие в строго организованном сельскохозяйственном эксперименте, чем на полевые исследования в реальной природе.

Данный факт подвиг меня на расширенный поиск методов исследования отношений. Шестидесятые годы XX века открывали для этого широкие возможности. Это был период бурного развития кибернетики и внедрения строгих математических методов во все сферы человеческой деятельности. Математическая логика и статистическая теория информации дали неплохие основания для полуколичественного исследования отношений и позволили существенно усилить содержательные результаты полевых исследований.

В принципе в то время были разработаны и важнейшие нетрадиционные методы статистического анализа, однако их использование ограничивалось возможностями вычислительной техники. Только с появлением персональных компьютеров весь интеллектуальный потенциал этих методов стал полностью доступен для любого исследователя.

Однако на практике анализ данных в мировой экологической науке, оперирующей с полевыми данными, обычно ограничивается стандартными дисперсионным и факторным анализами. При этом последний обычно используется там, где он теоретически неприменим. По моему

мнению, причина – в сохранившейся слабой адаптации существующих учебных пособий к мышлению натуралиста. Как и прежде, в докомпьютерную эпоху, в руководствах по статистическим методам анализа больше внимания уделяется не смыслу действий, а процедуре, написанию формул как алгоритмов некоторых действий без должного объяснения их содержания.

Опыт убедил меня в том, что натуралист обладает специфическим предметным мышлением, при котором смысл имеет только то, действие чего абсолютно понятно. Для натуралиста ответ на вопрос «как предметы и явления соотносятся друг с другом» является полезным, но промежуточным. Его в первую очередь интересует ответ на вопрос «почему они находятся в таких отношениях и к чему это приводит». Вероятность и случайность, несмотря на то, что с ними необходимо считаться, являются его врагами, и все его действия направлены на выявление детерминированных отношений. Именно поиск смысла в наблюдаемом заставляет его углубляться в предмет, хотя часто приводит к недоказуемым результатам. Вообще талант исследователя-натуралиста определяется способностью его мышления распутывать клубок отношений и взаимодействий, выбирать из множества возможностей наиболее достоверные. Он от рождения, не подозревая об этом, владеет законами различных логик и применяет их, соизмеряясь с реальным объектом, ощущает случайность и риск ошибочного вывода, ищет максимально простое объяснение отношений, обладающее при этом наибольшей общностью, и «эстетическая сторона» объяснения является для исследователя существенным критерием истинности.

Вместе с тем, интуитивный натурализм сплошь и рядом граничит с волюнтаризмом и часто опирается на аргументы типа «нам кажется, мы считаем, мы думаем». При этом, как «считают» и каков ход мысли, обычно не разъясняется. Тем не менее практика любого добросовестного натуралиста показывает, что ему действительно часто «кажется», и желаемое часто искажает действительное. Таким образом, чем сложнее объект, чем больше рассматриваемых взаимосвязанных переменных, тем труднее распутать клубок множества отношений.

В этом случае на помощь приходят количественные методы анализа данных, владение которыми необходимо для современного исследователя, решающего существенно более сложные задачи, чем его учителя. Однако использование этих методов без понимания их смысла и возможностей не исключает ошибочности выводов. Дело в том, что каждый метод опирается на некоторую модель отношений, и на его основе можно «раскрыть реальность» в том и только в том случае, если его логические основания адекватны ее свойствам. Иначе, каждый метод анализа можно рассматривать как отмычку, пригодную для определен-

ного типа замков. Сконструировать универсальную отмычку теоретически невозможно.

В предлагаемом пособии сделана попытка обобщить накопленный опыт изучения и применения количественных методов анализа данных.

При таком подходе необходимо начинать изучение предмета с изложения методологических основ организации самих исследований и важнейших элементов системологии, определяющих всю последовательность дальнейших действий.

Следует обратить особое внимание на возможность использования современным исследователем пакетов статистических программ, освобождающих его от непосредственных трудоемких вычислений. Наиболее распространенными и универсальными являются следующие программные продукты: Statistica, Systat, NCSS, SPSS. В основном все пакеты совпадают, но существенно различаются в деталях. В разных пакетах одни и те же методы могут быть представлены в несколько отличных версиях и с разной полнотой. Пакеты могут отличаться по максимальному объему данных, которые можно включить в анализ, по способу построения изображений и т. п. Опыт показывает, что примерно 90 % типичных задач можно успешно решить, используя пакет статистических программ Statistica. Однако в некоторых случаях приходится обращаться и к другим программным продуктам. Кроме того, в Интернете можно найти множество частных статистических программ, адаптированных для решения относительно узких экологических задач. Обычно эти задачи можно решить, используя пакет общего назначения. Однако такое решение более трудоемко.

Практика показывает, что если исследователь хорошо разобрался со способами управления расчетами в одном пакете программ, то он легко справится и с другими. Кроме того, во всех пакетах существует файл «Помощь» (Help), что позволяет пользователю разобраться в содержании проблемы и путях ее решения. Содержание «Помощи» столь полно, что ее можно рассматривать как оперативный учебник по статистике, адаптированный к конкретному программному продукту.

Это позволяет при изучении конкретных методов анализа и правил действий опираться на один пакет программ, например на Statistica. Можно не сомневаться, что по мере усложнения задач исследования читатель самостоятельно разберется и в других пакетах.

Наконец, необходимо обратить внимание на тот факт, что в современном информационном мире передать через курс лекций или через учебник все знания о предмете невозможно. Важно, чтобы был освоен некоторый базис знаний и умение самообучаться, постоянно перерабатывая новую информацию по соответствующей предметной области.

При этом не следует рассчитывать на то, что сразу же при первом прочтении все становится понятным. В некоторых случаях требуется многократный разбор содержания какого-либо текста или метода, иногда он становится понятным при обращении к другим источникам. Процесс расширения знаний непрерывен, и прекращение самообучения с полным основанием можно определить как моральную гибель любого исследователя. Каждый год вы должны узнавать и реализовывать что-то такое, чего не знали и не делали в прошлом. Постоянный поиск нового есть гарант вашего исследовательского здоровья.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОПЫТЫ В АГРОНОМИИ 6

1.1. Методы научных исследований 6
1.2. Основные элементы методики полевого опыта 23
1.3. Закладка и проведение полевого опыта 50

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ 65

2.1. Методы экологического мониторинга, оценка состояния окружающей среды 65
2.2. Методы изучения роста и развития лесных сообществ 94
2.3. Статистические методы анализа результатов эксперимента 113

ГЛАВА 3. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ КАЧЕСТВОМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ 133

3.1. Информация в современном обществе 133
3.2. Экологические информационные системы 140
3.3. Географические информационные системы 151
3.4. Использование информационных технологий в управлении качеством окружающей среды 157

ГЛАВА 4. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ 171

4.1. Методология системного анализа 171
4.2. Математические модели в системном анализе 189
4.3. Принципы построения математических моделей в экологии 199
4.4. Оптимизационные модели 216

ГЛАВА 5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ 242

5.1. Моделирование роста в экологии 242
5.2. Биоразнообразие в системе, его моделирование 251
5.3. Моделирование процессов газообмена и фотосинтеза у растений 271
5.4. Моделирование распространения возбудителей болезней и вредителей 285

5.5. Описание времени и климата в экологических моделях 298
5.6. Принципы построения двухпоточных моделей 304
5.7. Комплексная модель продукционного процесса растений 315
5.8. Безопасность и риск. Управление рисками 324
5.9. Примеры математических моделей сложных объектов 340

ПРИЛОЖЕНИЕ 348

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Пугачёва Ирина Геннадьевна

МЕТОДЫ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОСИСТЕМ

Учебное пособие

Редактор *Н. В. Боярова*
Компьютерная верстка *А. А. Пархомчик*
Корректор *И. М. Подоматько*

Подписано в печать 22.05.2018. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 20,7. Уч-изд. л. 23,6. Тираж 300 экз. Заказ 20.

Издатель и полиграфическое исполнение
государственное учреждение образования
«Республиканский институт высшей школы».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/174 от 12.02.2014.
Ул. Московская, 15, 220007, г. Минск.