



РОССИЙСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
им. А. И. ГЕРЦЕНА

---

**О. Г. Роговая**

# **ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: ПРАКТИКА**

Учебно-методическое пособие

*Допущено  
Учебно-методическим объединением  
по направлениям педагогического образования  
Министерства образования и науки РФ  
в качестве учебно-методического пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению  
«540100 (050100) Естественнонаучное образование»*

Санкт-Петербург  
2007

УДК 378.574  
Р59

Рецензент:

*Н. М. Александрова*, д. п. н., профессор  
ГНУ «Институт профтехобразования РАО»

**Роговая О. Г.**

Р59      Экологическое моделирование: практика: Учебно-методическое пособие. – СПб.: ООО «Книжный Дом», 2007. – 104 с. – ISBN 978-5-94777-109-1

В пособии раскрываются содержание и технология интеграции естественнонаучного, гуманитарного и математического компонентов образования на основе экологизации образовательного процесса и активизации субъективного опыта студентов.

Изложен теоретический и методический материал по основным вопросам экологического моделирования. В практикум вошли авторские разработки и адаптированные материалы отечественных и зарубежных ученых-практиков.

Пособие может быть эффективно использовано в подготовке бакалавров и магистров естественнонаучного и физико-математического образования в рамках экологических курсов. Высокая степень интеграции учебного материала и доступность изложения позволяет использовать части пособия в подготовке специалистов по гуманитарным и педагогическим специальностям.

© О. Г. Роговая, 2007

© Оформление

ООО «Книжный Дом», 2007

ISBN 978-5-94777-109-1

## От автора

Ориентация высшего профессионального педагогического образования на профессиональную компетентность как результат подготовки специалиста обусловила изменения в содержании вариативного компонента общепрофессионального цикла. Противоречия между высокими требованиями профессиональной подготовки педагога и современной социо-гуманитарной ситуацией могут преодолеваются при использовании специальных технологий обучения с реализацией принципов гештальт-подхода и лично ориентированной парадигмы.

*Гуманитарная технология интеграции* естественнонаучного, гуманитарного и математического компонентов образования на основе экологизации образования и активизации субъектного опыта студентов успешно *реализуется при:*

- активизации собственной активности (субъектности) студента;
- учете индивидуального стиля обучения студента и опоре на его витагенный опыт;
- индивидуально-групповой дифференциации учебной деятельности;
- принятии студентом целей деятельности.

Методологической основой конструирования новых учебно-методических пособий являются следующие принципы: рефлексивность, интерактивность и проективность. Принцип *рефлексивности* предполагает опору на собственный опыт как чувственно-эмпирическую основу формирования позиции студента. Профессиональная рефлексия обеспечивает готовность действовать в ситуации с высокой степенью неопределенности, гибкость в принятии решений, способность переосмыслить стереотипы своего профессионального и личного опыта. Принцип *интерактивности* (через со-переживание к со-знанию) предполагает использование методов, максимально способствующих продуктивному взаимодействию и общению – ценностно-смысловому диалогу между участниками образовательного процесса, между которыми происходит разделение ответственности за результаты обучения. Принцип *проективности* – концептуализации своей личной позиции, реализуется в процессе разработки проектов при актуализации индивидуально-творческого начала.

В этой связи в структуре учебных материалов выделяют три этапа освоения содержания образования, три качественно своеобразных блока материала: рефлексивный, теоретический, проективный. Это позволяет студенту самостоятельно или в групповой работе освоить материалы, опираясь на свой опыт, связав теоретическое понимание проблемы с практической реализацией полученных знаний. Материалы рефлексивного блока содержания обращают студента к осмыслению собственного опыта, в результате чего предполагается переход студента от эмпирических представлений к теоретическому восприятию определенного аспекта действительности. Для учета индивидуального стиля обучения студенту предоставляется возможность выбора вида деятельности при освоении дидактических единиц. В итоге освоения

теоретического блока подразумевается понимание студентом выделенных в науке закономерностей, выражающееся в способности представить в реальности описываемые теоретические модели. Осмысление и осознание ситуаций позволяет оформить смыслы деятельности в личностные ценности. Этот этап характеризуется развитой познавательной активностью студента, что должно побудить его к дальнейшему чтению. В проективный блок включены методические описания практических работ по моделированию, но предложено разработать и свои варианты организации деятельности. Проективный блок позволяет перевести студента на более высокий творческо-поисковый уровень.

При проведении интегрированного практикума (или при выполнении отдельных лабораторных и практических работ) у студентов продолжают развиваться умения, которые они приобрели в процессе изучения базовых дисциплин: химии, биологии, экологии, физики, географии, математики и других а также важнейшие универсальные умения:

- правильно выделять те теории, на которые необходимо будет опираться при моделировании;
- раскрывать значения теорий, обобщать теории и устанавливать их взаимосвязь;
- вести наблюдения за поставленным экспериментом и делать выводы на основе таких наблюдений;
- интерпретировать полученные результаты;
- описывать эксперимент и представлять результаты в разных формах с использованием символично-графических средств отображения информации (обобщающие таблицы, схемы, графики, рисунки);
- активно использовать информационно-коммуникационные технологии;
- осуществлять поиск нужной информации, используя справочно-библиотечно-библиографический аппарат и со-

временные информационно-поисковые компьютерные системы.

Такие умения высшего порядка можно определить как умения осуществлять всесторонний перенос знаний и способов умственной и практической деятельности, устанавливать между ними различные виды взаимосвязей для решения проблем и задач будущей жизнедеятельности. Овладение умениями такого рода способствует формированию интегративного мышления, при этом человек по-другому начинает смотреть на мир, осознавая его сложность, системность и многовариантность, что крайне важно для достижения целей экологического образования.

Коммуникация и взаимодействие являются неотъемлемыми компонентами современного образования. Часть предлагаемых работ предполагает использование интерактивных и групповых форм обучения для развития опыта коммуникации, а также опыта взаимодействия, позволяющего соединить малые достижения каждого в совместное знание сложного механизма природы.

Структурные компоненты субъектного опыта отражают опыт взаимодействия человека с окружающим миром в двух аспектах: через деятельность (в том числе познавательную) по преобразованию мира и через проявление эмоционально-ценностных отношений.

В субъектный опыт входят (по И. С. Якиманской<sup>1</sup>):

- предметы, представления, понятия;
- операции, приемы, правила выполнения действий (умственных и практических);
- эмоционально-ценностные коды (личностные смыслы, установки, стереотипы).

В вероятностной модели языка (по В. В. Налимову<sup>2</sup>) каждое слово имеет различные значения, которые в какой-то мере могут быть представлены в том или ином толковом

словаре, но если подумать о разнообразии различных оттенков этих значений, то становится ясным, что любого дискретного набора значений (который только и может быть представлен в словаре) недостаточно. Понимание смысла слова моделируется индивидуальным фильтром, вообще говоря, своим для каждого человека и для данной конкретной ситуации. В соответствии с этой моделью, например, слово «экология» имеет одно значение для специалиста в этой области науки (у него свой фильтр): оно обозначает определенную совокупность конкретных задач, методов их решения и полученных результатов. Совершенно другим — гораздо более широким — будет смысл слова «экология» для специалиста в другой области, далекой от биологии. В этом случае слово «экология» будет в первую очередь связываться с проблемами среды, в которой живет человек: «ты мне всю экологию портишь!».

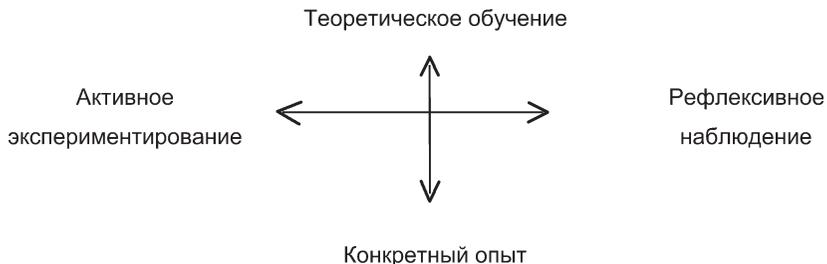
Прошлый субъектный опыт человека может подавлять процесс осознания новой информации, поэтому субъектный опыт студента необходимо учитывать, корректировать и пополнять. При организации образовательного процесса и разработке научно-методического обеспечения необходимо ориентироваться на все четыре возможных стиля обучения для повышения уровня интеграции субъектов образовательного процесса.

В концепции Д. Коньяртса, Дж. Стевена и Г. ван Хорбека<sup>3</sup> выделяются четыре возможные (по две противоположных пары) базовые ориентации студентов на различные удобные для них модели обучения:

- теоретическое обучение или обучение через освоение эффективного опыта;
- обучение через рефлексивное наблюдение или обучение через активное экспериментирование.

Естественно, что в каждом человеке ни одна из этих ориентаций не представлена в чистом виде, но в целом удобный

для человека стиль обучения, а следовательно, и освоения того или иного профессионального опыта можно представить в виде следующей схемы, напоминающей оси координат.



Человек, ориентированный на **«теоретическое обучение»**, предпочитает получать образование в таких формах, которые дают ему наибольшие возможности для анализа абстрактных концепций, ведь для осознания чего-либо ему необходимо теоретическое осмысление. Такой человек решает проблемы только с опорой на научно-теоретические обоснования, полагается на логическое мышление и рассудок, для него важно освоить фундаментальные принципы и подходы к решению задачи, а в ситуации выбора он предпочитает всестороннюю логическую оценку вариантов. В этой группе преобладают «левополушарники», интроверты и «аудиалы», для них имеет значение системность, планирование и регламентированность учебного процесса.

Представители группы, ориентированной на **«освоение эффективного опыта»** хорошо обучаются на основе конкретных методик и инструкций. Они считают, что теория помогает меньше, чем изучение чужого опыта или обмен опытом, при этом они ориентируются более на равных себе, чем на тех, кто выше их по статусу или уровню знаний. В ситуации обучения они открыты, интуитивны и легко адаптируются. В этой группе преобладают «правополушарники», экстраверты и «кинестетики» и «визуалы», для них имеет

значение формирование крепкого коллектива, наличие групповых форм работы в ходе учебного процесса и проведение внеаудиторных занятий.

Люди, предпочитающие **«активное экспериментирование»** могут быть охарактеризованы антитезой известной пословицы «семь раз отмерь, один отрежь», т. е. это деятели, которые учатся «методом проб и ошибок». В обучении их интересуют новые яркие идеи, эксперименты, им не нравятся пассивные виды учебной деятельности, в любой заимствуемый опыт они вносят какие-то собственные элементы. В этой группе преобладают «правополушарники», экстраверты и «кинестетики» и «аудиалы». В образовательном процессе для них имеет значение практическая направленность учебной деятельности, возможность самостоятельно разрабатывать и реализовывать учебные проекты, участвовать в небольших дискуссиях.

Для **«рефлексивного наблюдателя»** обсуждение любого происшествия важнее, чем само происшествие, позиция и отношение для него важнее результативности. Представители этой группы в учебном процессе опираются на наблюдение и предпочитают учебные ситуации, в которых они могут выступить в качестве экспертов, рассматривая ситуацию с разных точек зрения. Обучение у них происходит через осознание и осмысление собственных эмоций и переживаний по поводу тех или иных событий. В этой группе преобладают «левополушарники», интраверты и «визуалы» и «аудиалы». В образовательном процессе для них имеет значение доброжелательная атмосфера, наглядность и эмоциональность дидактического материала, эстетика образовательного пространства.

Вся практическая деятельность человека в том числе подготовка его как специалиста, так или иначе связаны с моделированием. Моделирование широко используется в

образовательной деятельности вузов. С его помощью, как правило, разрабатываются: учебные программы, тематические планы, структурно-логические схемы, учебные пособия для студентов и профессорско-преподавательского состава, профиессиограммы будущих специалистов.

Моделирование широко используется и как средство обучения – формирование и развитие навыков и умений моделирования природных и социальных явлений и процессов у студента. При этом в распоряжении исследователей находится широкий спектр методов: философский, системный, функционально-нормативный, экспертный, графологический, эмпирический, программно-целевого конструирования, игрового моделирования и др. Моделирование, как показывает опыт, эффективно, поскольку модель воспроизводит ядерные связи и отношения объекта (или явления) и помогает систематизировать мысль, представить большой объем информации емко, выделить отличительные и общие черты, делает сложный материал более доступным и наглядным.

Сегодня важно не столько содержание учебного материала, сколько то, как обучаемые усваивают эти знания и превращают их в навыки. Следовательно, важнейшая задача педагога – уметь раскрепостить мышление студента, научить его быстро и квалифицированно принимать оптимальные решения, творчески обосновывать их, создавать условия, необходимые для их реализации в любых нестандартных ситуациях. Несомненно, что ведущая роль в учебном процессе вуза при подобном подходе должна принадлежать функционально-деятельностному обучению, моделированию и проектированию профессиональной деятельности как методам, лежащим в основе этих занятий.

# 1

## Методологические и теоретические основы процесса моделирования

---

Моделирование в научных исследованиях стало применяться еще в глубокой древности и постепенно захватывало все новые области знаний: техническое конструирование, строительство и архитектуру, астрономию, физику, химию, биологию и, наконец, общественные науки. Большие успехи и признание метода моделирования практически во всех отраслях современной науки принес XX в. Однако методология моделирования длительное время развивалась отдельными науками, и в силу этого отсутствовала единая система понятий, единая терминология. Лишь постепенно стала осознаваться роль моделирования как универсального метода научного познания.

Главная особенность моделирования состоит в том, что это метод опосредованного познания с помощью объектов-заместителей. Модель выступает как своеобразный инструмент познания, который исследователь помещает между собой и объектом и с помощью которого изучает интересую-

ций его объект. Иными словами, процесс моделирования включает три основных элемента: субъект (исследователь), объект исследования, модель, опосредствующую отношения познающего субъекта и познаваемого объекта. Именно эта особенность метода моделирования определяет специфические формы использования абстракций, аналогий, гипотез, других категорий и методов познания<sup>4</sup>. Под моделированием понимается процесс построения, изучения и применения моделей. Оно тесно связано с такими мыслительными процедурами, как абстрагирование, аналогия, обобщение, формализация и др. Процесс моделирования предполагает построение умозаключения по аналогии и конструирование научных гипотез. Моделирование как метод исследования сложных объектов, явлений и процессов путем их упрощенного имитирования (натурного, математического, логического) основывается на теории подобия (сходства) с объектом-аналогом<sup>5</sup>.

*Моделирование* – это метод опосредованного практического и теоретического оперирования объектом, при котором исследуется непосредственно не сам интересующий объект, а используется вспомогательная искусственная или естественная система (модель), соответствующая свойствам реального объекта<sup>6</sup>.

*Моделирование* – это разработка, исследование модели и распространение модельной информации на оригинал<sup>7</sup>. Модель, согласно В. А. Штоффу (1966) – это «мысленно представляемая или материально реализованная система, которая отражая или воспроизводя объект исследования, способна замещать его так, что ее изучение дает новую информацию об этом объекте». Именно ради этой дополнительной новой информации (т. е. эмерджентного свойства модели) и применяется моделирование. Модель – это вспомогательный объект, находящийся в определенном объективном со-

ответствии с познаваемым оригиналом и способный замечать его на отдельных этапах познания. Модели очень полезны также как средство интеграции всего того, что известно о моделируемой ситуации, при этом они и выявляют неточности в исходных данных об объекте, определяют новые аспекты его изучения.

Выступая универсальным методом научного исследования, моделирование обладает рядом специфических особенностей:

1. Моделирование дает возможность изучать процесс до его осуществления. При этом выявляются возможные отрицательные последствия, что позволяет ликвидировать или ослабить их до реального проявления. Прогнозирование последствий – одна из важнейших целей (задач) моделирования.

2. Моделирование позволяет более целостно изучить процесс, так как появляется возможность выявить не только элементы, но и связи между ними, рассмотреть образовательную ситуацию с различных сторон.

3. Процесс, представленный моделью, выглядит рельефно, что облегчает теоретический анализ, а следовательно, обоснование путей его совершенствования.

4. Ввиду того, что при моделировании ситуации сознательно (в целях исследования) упрощаются, становится возможным применять количественные методы анализа и получать на их основе научно обоснованные сведения о процессе.

При построении любой модели главная задача – создать модель достаточной полноты. Для этого необходимо стремиться учесть все существенные факторы, влияющие на рассматриваемые явления; уделить специальное внимание наличию в ней противоречивых элементов как одного из признаков полноты модели; учесть возможность появления неизвестных факторов, чтобы в случае необходимости дополнить модель новым элементом. Следует отметить, что

получение новой информации с помощью моделирования не является самоцелью, а служит лишь средством совершенствования изучаемого процесса. Моделирование выступает как этап деятельности, направленной на изменение состояния системы или объекта в сторону улучшения его функционирования.

В обосновании общих принципов моделирования заслуживает внимания подход Э. М. Хакимова<sup>8</sup>, который выделяет:

1. *Принцип противоречивости* в моделировании, отражающий противоречивое единство интуитивно-содержательного и формального методов изучения объекта (представление о «границах» формализации и полноте формализованных и содержательных описаний).
2. *Аксиоматизацию* как принцип моделирования (постулирование в аксиомах свойств и отношений по степени общности, всеобщности и конкретности).
3. *Принцип ограничения* множества отношений объекта с другим объектом (со средой).
4. *Многомодельность* как принцип моделирования, отражающий динамику объекта (классификация и субординация моделей).
5. *Принцип аналогии* объекта и модели (связан как с многомодельностью, так и с развитием объекта и знаний о нем, а также возникновением нового знания) и др.<sup>9</sup>

Принимая во внимание требования к модели<sup>10</sup>, которая предполагает, что метод создания модели понятен всем и обоснован, описываемые компоненты модели должны быть:

- точными и полными, т. е. не содержать пробелов в перечне функциональных или системных характеристик, в то же время не содержать лишних характеристик;
- четкими и лаконичными с достаточной степенью детализации;

- приемлемыми, т. е. смысл и польза от их применения отчетливо представлены тем, кто использует данные модели;
- легкими и доступными в использовании, т. е. соответствовать опыту и навыкам тех, кто будет их использовать, сопровождаться инструкциями (или предполагать обучение), поясняющими, как использовать данные модели, а также предполагать использование индикаторов, основанных на оцениваемых проявлениях.

В зависимости от особенностей системы-оригинала и задач исследования применяются разнообразные модели (рис. 1). По способу построения *все модели делят на два класса: материальные* (в других классификациях – реальные, натуральные, аналоговые, физические) и *идеальные* (знаковые). Материальные модели по своей физической природе сходны с оригиналом. Они могут сохранить геометрическое подобие оригиналу (макеты, тренажеры, искусственные заменители органов и т. д.), подобие протекания физических процессов с оригиналом – физическое моделирование (гидрологическая модель – течение воды и т. п.) и могут быть природными объектами – прообразами оригинала, т. е. натурными моделями (метод пробных участков). Материальные модели используются обычно в технических целях.

Более подходящими для экологического моделирования являются идеальные модели, представляющие собой описание оригинала в словесной форме или посредством символов и операций над ними, отражающих исследуемые особенности оригинала. Идеальные модели подразделяются на три концептуальные и математические. Вербальные модели – это формализованный вариант традиционного естественно-научного описания в виде текста, таблиц и иллюстраций<sup>11</sup>. Схематические модели разрабатываются в виде различного рода схем, рисунков, графиков и фотографий, основные их достоинства – наглядность, информативность и простота построения.

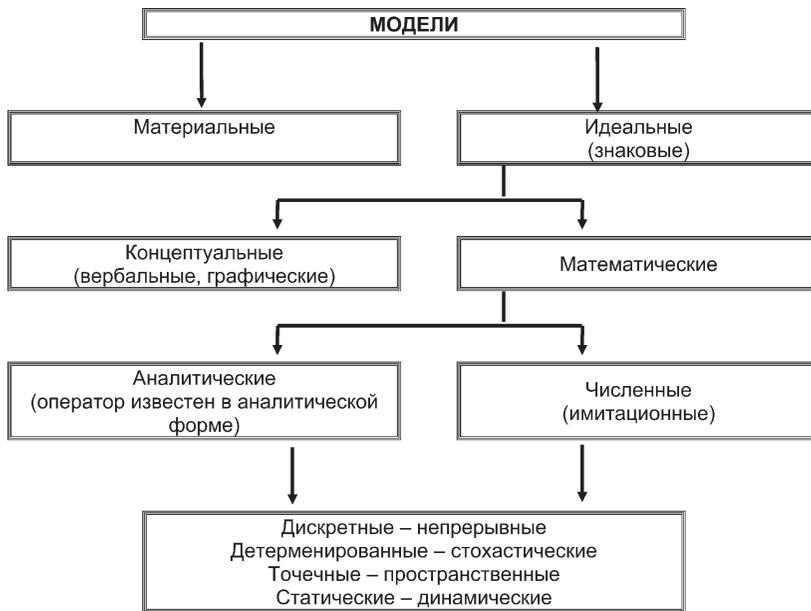


Рис. 1. Виды моделей

Вербальные и схематические модели в то же время являются неотъемлемой частью качественного анализа математического моделирования. Суть математического моделирования заключается в том, что с помощью математических символов строится абстрактное упрощенное подобие изучаемой системы. Далее, меняя значение отдельных параметров, исследуют, как поведет себя данная искусственная система, т. е. как изменится конечный результат.

«Математическая модель» – это математическое описание оригинала, отражающее его целостность структуру, динамику, функционирование и взаимосвязи оригинала, внешних и внутренних факторов воздействия». Математические модели могут быть классифицированы по ряду признаков, в соответствии с которыми выбирается аппарат ка-

кого-либо раздела математики. По своему характеру выделяют модели статические и динамические. Статическая модель отражает объект (систему), не изменяющий свое состояние во времени, а динамическая модель отражает объект (систему), изменяющий свое состояние во времени. Математические модели, которые выводятся на основании теоретических посылок, называются *априорными*, а построенные по эмпирическим данным – *апостериорные*. Математические модели, строящиеся с применением компьютеров, называют *кибернетическими*. Математическая модель реальной системы достаточно полно отражающая ее структуру и взаимосвязи между элементами, обычно бывают настолько сложными, что требуют использования численных методов компьютерной обработки данных. В этих случаях чаще всего говорят об *имитационном моделировании*.

Сам процесс математического моделирования, по И. Я. Лиепа (1982), можно разделить на четыре этапа:

- качественный анализ,;
- математическая реализация;
- верификация;
- изучение моделей.

*Первый этап моделирования – качественный анализ* – является основой любого объектного моделирования. На его основе формируются задачи, и выбирается вид модели. Этот этап обязан обеспечить соответствие модели двум вышеуказанным требованиям. Вид модели выбирается исходя из способа построения, из характера самого объекта и др.

На этом этапе определяются основные внутренние и внешние факторы, величины и взаимосвязи между ними, которые будут учитываться в модели. Естественно, что учитываемые факторы зависят от целей исследования, которые должны быть четко сформулированы. Обычно результатом словесного описания системы служит схема ее функциони-

рования, на которой отражены основные учитываемые величины и взаимосвязи между ними.

Выбранные для включения в модель величины получают свое количественное выражение. Здесь очень важно правильно определить степень детализации (дезагрегации) используемых величин. Наиболее существенная и сложная часть работы на этом этапе состоит в нахождении «законов эволюции» рассматриваемой системы, т. е. количественного выражения взаимосвязей между величинами, ранее описанными словесно. Трудность заключается в том, что обычно информация об этих связях недостаточна и не существует какой-либо общей методики нахождения конкретного выражения этих связей.

Применяемые методы грубо можно разделить на три группы.

1. Использование естественнонаучных закономерностей о связи между величинами. Такого рода закономерности устанавливаются экспериментально или теоретически в соответствующих конкретных науках.

2. Использование статистических данных. В некоторых случаях о связи между величинами имеется достаточно богатый статистический материал, позволяющий использовать для определения вида связи такие методы математической статистики, как регрессионный, дисперсионный анализы. Применение методов математической статистики для установления связей между переменными должно обосновываться. Дело в том, что часто статистические данные – это данные либо лишь о прошлом поведении системы, либо о поведении других систем, относительно которых, однако, есть основания предполагать, что действующие в них закономерности схожи с теми, которые действуют в изучаемой системе.

3. Использование качественных представлений. К сожалению, очень часто нет ни необходимых ста-

статистических данных, ни тем более твердо установленных закономерностей. В таком случае обычно приходится приходить на помощь различные качественные, интуитивные соображения о характере влияния одних величин на другие. К такого рода качественным соображениям следует, например, отнести применение статистических данных по аналогии.

*Второй этап моделирования* – это математическая реализация логической структуры модели. С точки зрения технологии применения математических методов аналитическая модель – это построение теоретических концепций с применением строгого математического аппарата, обычно позволяющего вывести общую формульную зависимость. Имитационные кибернетические модели отражают представления исследователя о взаимосвязях в системе и способах их реализации. Наилучшие результаты эти модели дают при составлении прогноза изменений в системе. Самоорганизующиеся кибернетические модели относятся к классу регрессионных уравнений, в них широко используются вероятностно-статистические методы расчетов.

Имитационное моделирование не требует строго формального описания системы: достаточно в общих чертах знать алгоритм функционирования и взаимодействия элементов системы<sup>12</sup>. Алгоритм может быть задан описательно и в дальнейшем служить основой составления машинной программы. При таком подходе основной упор делается на то, чтобы ввести в рассмотрение возможно более реалистичные предположения, так как обычно такого рода модели разрабатываются для ответа на конкретные вопросы, а вследствие больших возможностей современных компьютеров не имеет смысла ограничивать себя, используя в модели слишком много упрощающих предположений. В имитационной модели можно очень полно отразить особенности ре-

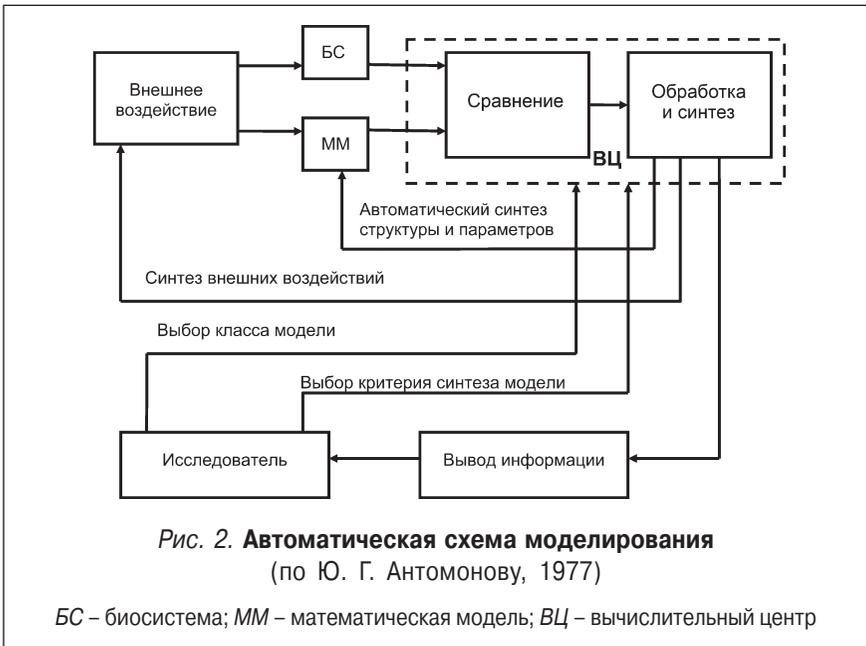
альной системы, взаимосвязи между ее отдельными частями. Модель эта обычно имеет блочную (модульную) структуру, которая позволяет сравнительно легко корректировать модель с учетом изменения наших знаний об изучаемых процессах. Конкретные модели могут быть представлены в аналитической форме (системой аналитических уравнений) или в виде логической схемы машинной программы. В некоторых случаях система уравнений, составляющая модель, достаточно проста, чтобы получить решение и произвести анализ без помощи компьютера. В этом случае можно говорить о традиционном моделировании, в котором используются аналитические модели.

*Третий этап моделирования* предусматривает верификацию модели: проверку соответствия модели оригиналу. На этом этапе необходимо удостовериться, что выбранная модель отвечает второму требованию: адекватно отражает особенности оригинала. Для этого может быть проведена эмпирическая проверка – сравнение полученных данных с результатами наблюдений за оригиналом. Модель может быть признана высококачественной, если прогнозы оправдываются. При отсутствии эмпирических данных проводится теоретическая верификация – по теоретическим представлениям определяется область применения и прогностические возможности модели. Этот этап обязательно включает в себя проверку модели на чувствительность, т. е. ответ на вопрос, как изменяются выводы, полученные из модели, при варьировании используемых констант, изменении вида связи между переменными. Анализ на чувствительность позволяет оценить качество модели с точки зрения ее внутренней структуры и определить те взаимосвязи, которые нуждаются в уточнении.

*Четвертый этап моделирования* – это изучение модели, экспериментирование с моделью и интерпретация модельной информации. Основная цель этапа — выявление новых

закономерностей и исследование возможностей оптимизации структуры и управление поведением моделируемой системы, а также пригодность модели для прогнозирования. При значительном расхождении сведений модель отвергают или совершенствуют. При согласованности результатов модели используют для прогноза, вводя в них различные исходные параметры.

Поиск наилучшей структуры модели может производиться автоматически на основании некоторой системы критериев (рис. 2), но иногда целесообразно использовать человека, на которого возлагают выбор и корректировку критериев в динамике<sup>12</sup>.



Учитывая, что любая модель не может быть точной копией реального объекта, а есть лишь приближенное отражение уровня наших знаний о нем, при любых применениях

физико-математических методов к реальным явлениям всегда возникают проблемы адекватности математических моделей. Построение эффективной модели для решения в достаточно полном объеме сложной задачи, определенной на основе анализа эмпирических данных или в случае применения вероятностно-статистических методов, особенно проблематично в случае решения прикладных задач.

Например, в настоящее время при формализации социально-экономических и экологических процессов часто используются эмпирические соотношения, полученные с помощью наблюдений за фактической статистикой, без достаточного анализа, устанавливающего пределы их использования. Ключевая проблема описания экономического механизма – определение связи между экономическим выходом системы и располагаемыми ресурсами – обычно решается с помощью задания так называемой производственной функции. Подобные решения вопроса аналитического описания процесса производства неоднократно подвергались критике за неполноту учитываемых факторов и неудачное описание научно-технического прогресса как экзогенной характеристики. Однако главный недостаток стандартного метода построения производственных функций заключается в отсутствии учета управляющих воздействий. Другой пример неопределенности на проводимое моделирование приведен в Приложении.

Особую проблему в моделировании экологических систем и явлений представляет *принцип эмерджентности*, т. е. учет появления нового интегративного свойства системы, несводимого к свойствам подсистем. Учитывая, что экосистемы управляются не всеми, а ключевыми, эмерджентными факторами, их обнаружение и учет является обязательным при практической реализации экологических моделей.

# 2

## **Моделирование как метод экологических исследований**

---

Методологические основания экологического моделирования лежат в отношении методологии системного моделирования и фундаментальных принципов развития экосистем. Принцип единства формализованного и неформализованного описания (в идеале – всестороннего) экологических процессов и явлений отражает универсальность экологического моделирования – способность единой методикой охватить разнородные, разнокачественные процессы. Принцип единства теории и практики существует, потому что доказана целесообразность двустороннего подхода к социально-экологическому моделированию – построение общей концепции и выход в практическую область. Принцип значимости аксиологических и культурологических факторов вытекает из органической целостности субъекта и объекта экологических проблем.

Признание системного принципа организации природы как предмета экологии обусловило необходимость примене-

ния системного подхода как особого направления экологического исследования, сущность которого заключается в изучении всех компонентов системы, в их взаимодействии друг с другом и в развитии (в пространстве и во времени). Конечной целью исследования является построение модели системы, адекватно отражающей саму природную систему. Универсальность метода системного моделирования состоит в способности применения единой методики для описания разнородных и разнокачественных процессов в единстве структурности и иерархичности системно-экологических моделей.

Надорганизменные системы (популяции, биоценозы, экосистемы, биосфера), изучаемые экологией, чрезвычайно сложны. В них возникает большое количество взаимосвязей, сила и постоянство которых непрерывно меняются. Одни и те же внешние воздействия нередко приводят к различным, а иногда и к противоположным результатам. Это зависит от состояния, в котором находилась система в момент воздействия. На действие конкретных факторов предвидеть ответные реакции системы можно только через сложный анализ существующих в ней количественных взаимоотношений и закономерностей. Уникальность природных систем, вовлекаемых в крупномасштабные проекты, сильно ограничивает возможности активного экспериментирования с ними. Поэтому широкое распространение в экологии получило моделирование, особенно при изучении и прогнозировании взаимовлияния антропогенной деятельности и окружающей природной среды.

Модели активно и успешно используются в прогнозировании экологического развития, ГИС-технологиях, описании медико-демографических процессов или распространения загрязнений в окружающей среде, оптимизации хозяйственной деятельности человека и т. п. Из материальных

моделей наиболее широко распространены в природопользовании физические модели. Например, при создании крупных проектов, таких, как строительство ГЭС, связанных с изменениями окружающей природной среды. Вначале строятся уменьшенные модели устройств и сооружений, на которых исследуются процессы, происходящие при заранее запрограммированных воздействиях.

Имитационное моделирование широко используется при исследовании экосистем, и особенно биосферы, т. е. там, где учитывается множество разнохарактерных структурных компонентов экосистемы и многофункциональное их поведение. При этом для построения удовлетворительной модели в виде структурной схемы не нужно необъятного количества информации об огромном множестве переменных. Четырехкомпонентная структурная схема экосистем представлена на рис. 3, где показаны четыре основных компонента, учитываемых при моделировании экосистемы (Ю. Одум, 1986).

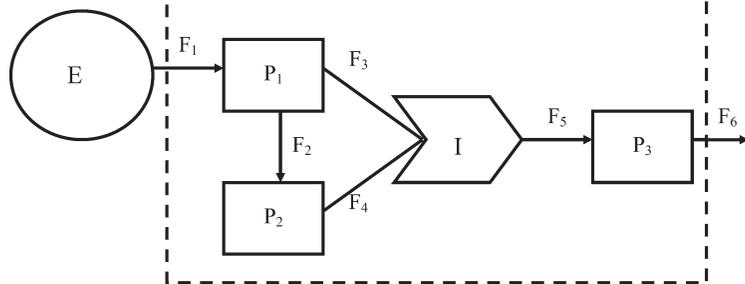


Рис. 3. Структурная схема

$E$  – движущая сила;  $P$  – свойства;  $F$  – потоки вещества и энергии;  $I$  – взаимодействие

На рис. 3 буквами  $P_1$  и  $P_2$  обозначены два свойства, которые при взаимодействии  $I$  дают некое третье свойство  $P_3$ .

(или влияют на него), когда система получает энергию от источника  $E$ . На схеме обозначены также пять направлений потоков вещества и энергии ( $F$ ), из которых  $F_1$  – вход, а  $F_6$  – выход для системы как целого. Поэтому, в работающей модели экологической ситуации имеется как минимум четыре ингредиента или компонента:

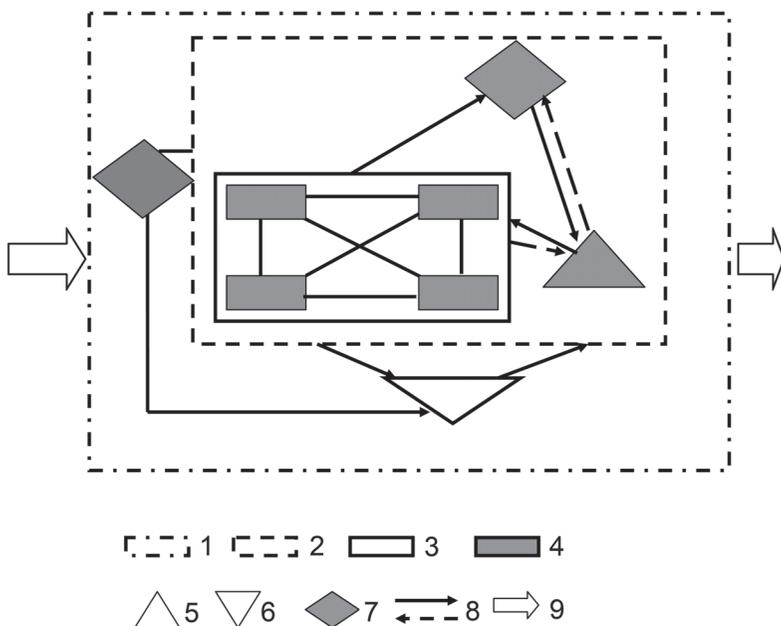
- 1) источник энергии или другая внешняя *движущая сила*;
- 2) свойства, которые системные аналитики называют *переменными состояний*;
- 3) *направления потоков*, связывающих свойства между собой и с действующими силами через потоки энергии и вещества;
- 4) *взаимодействия* или *функции взаимодействий* там, где взаимодействуют между собой силы и свойства, изменяя, усиливая или контролируя перемещение веществ и энергии или создавая качественно новые (эмерджентные) свойства.

Конкретизировать эту структурную схему можно на примере *лугопастбищной экосистемы*, в которой  $P_1$  – зеленые растения, превращающие солнечную энергию  $E$  в пищу. В этом случае  $P_2$  обозначает растительноядное животное, поедающее растения, а  $P_3$  – всеядное животное, которое может питаться как растительноядными, так и растениями. Взаимодействие  $I$  может представлять несколько возможностей. Это может быть «случайный» переключатель, если наблюдения в реальном мире показали, что всеядное животное  $P_3$  питается  $P_1$  и  $P_2$  без разбора в зависимости от их доступности. Взаимодействие  $I$  может также иметь постоянное процентное значение при обнаружении, что рацион  $P_2$  состоит, к примеру, на 80% из растительной и на 20% из животной пищи, независимо от того, каковы запасы

$P_1$  и  $P_2$ . Взаимодействие  $I$  может быть и «сезонным» переключателем в том случае, когда  $P_3$  питается растениями в один сезон года и животными – в другой. Наконец, взаимодействие  $I$  может быть пороговым переключателем, если  $P$  сильно предпочитает животную пищу и переключается на растения только тогда, когда уровень  $P_2$  падает ниже определенного порога.

Структурные схемы являются разновидностью графических моделей. Графические модели раскрывают зависимость между процессами также в виде таблицы, диаграммы или графика. В качестве научной основы природопользования используется модель геосистемы (географической системы). Эта модель применяется в природопользовании для прогнозирования, а также с целью управления природопользованием посредством воздействия на один компонент для получения положительного эффекта от другого. Природная геосистема рассматривается обычно как сравнительно простая географическая модель, описывающая саморегулирующуюся систему. Целостность такой системы поддерживается взаимосвязью природных компонентов. В более сложные модели в качестве нового элемента вводится человек (общество) и орган управления, который принимает и контролирует решения. Модель такой интегральной геосистемы представлена на рис. 4.

Человек способен не только приспособливаться к природной геосистеме, но и ее преобразовывать. Использование таких моделей является типичным при изучении систем типа «человек – среда». Используя данные модели, можно проследить цепочку: воздействия на природный комплекс  $\Rightarrow$  изменения в окружающей среде  $\Rightarrow$  последствия изменения природы для человеческой деятельности  $\Rightarrow$  изменения деятельности в сторону оптимизации  $\Rightarrow$  изменение оказываемого воздействия на окружающую среду и т. д.



**Рис. 4. Модель интегральной геосистемы**

- 1 – граница интегральной геосистемы;
- 2 – граница природно-технической геосистемы;
- 3 – граница природной геосистемы;
- 4 – природные компоненты, элементы;
- 5 – технические элементы, подсистемы;
- 6 – население;
- 7 – орган управления, принимающий и контролирующий решения;
- 8 – связи между компонентами, элементами, подсистемами;
- 9 – связи на входе и выходе систем.

Система «общество – окружающая среда» настолько перенасыщена связями, что высказывалось мнение о крайней сложности самой формулировки проблем окружающей среды на уровне всей биосферы, что связано с огромными временными параметрами биосферы, не сравнимыми с жиз-

ненным циклом исследователей, с трудностью различения и сопоставления антропогенных и природных процессов и их масштабов. В сфере современной экологии объект и среда проникают друг в друга, и даже меняются местами в процессе обмена веществом, энергией, информацией, что объясняет результативность только целостно-системной методологии. Необходимость учета факторов неопределенности и стохастичности, как объективных свойств условий, сопутствующих процессу развития экологических систем, связана с неполнотой и относительностью исходной информации о функционировании экосистем, результатов мониторинга и трудностями передачи информации с одного уровня иерархической структуры на другой и др.

Особенность современных человековключенных экологических систем является кризисность состояния, и, следовательно, для экологического моделирования имеет решающее значение предварительное определение критических точек, после достижения которых, процесс становится необратимым, хотя внешнее его течение еще может представляться благополучным. Еще одна особенность заключается в том, что адаптивность социоэкологических систем предполагает не только адаптивность природы к техногенным воздействиям, но и адаптивность общества к воздействиям факторов окружающей среды, т. е. общество выступает в качестве адаптивно-адаптирующей системы<sup>13</sup>.

Подобное построение модели глобальной экосистемы и жизнеобеспечения человечества интегрирует в едином процессе экологического исследования междисциплинарный подход, в котором применяются наряду с информационно-статистическими эмпирические и социологические методы. Они позволяют существенно расширить возможности практического исследования экологических систем и оценива-

ния эффективности природоохранных технологий, объективно обрабатывать информацию, периодически обновлять сведения, осуществлять и интерпретировать результаты экологического мониторинга, оценивать действия экстремальных факторов внешней среды, последствий глобальных и локальных природных и техногенных катастроф<sup>14</sup>.

В заключение можно сделать вывод о роли моделирования в экологических исследованиях и экологическом образовании. Использование терминов «модель», «математическая модель» и самих моделей для познания экологических процессов ознаменовало шаг вперед по сравнению с классическим методологическим подходом, «поскольку модельные представления более свободно модифицируют достаточно жесткие законы поведения исследуемых объектов»<sup>15</sup>.

Рассмотрим две наиболее известные модели, используемые в экологических исследованиях: модель хищник – жертва и модель конкуренции двух видов.

### *Модель хищник – жертва*

Пусть  $N_1 = N_1(t)$  – численность жертв,  $N_2 = N_2(t)$  численность хищников. Если бы хищников не было, то жертвы размножались бы (как мы предполагаем) экспоненциально быстро:  $dN_1/dt = k_1N_1$ . Но если имеется одновременно  $N_1$  жертв и  $N_2$  хищников, то вероятность встречи хищника и жертвы (при которой жертва будет съедена), скорее всего, пропорциональна произведению  $N_1N_2$ , так что за время  $dt$  будет съедено  $\alpha_{12}N_1N_2$  жертв. Отсюда получаем уравнение

$$dN_1/dt = k_1N_1 - \alpha_{12}N_1N_2 \quad (1)$$

где  $\alpha_{12}$  – степень влияния 2-го вида на 1-й.

Если бы жертв не было, то хищники гибли бы от голода и, вероятно, экспоненциально быстро:  $dN_2/dt = -k_2N_2$ . Но при достаточном количестве пищи можно предположить,

хищники размножаются со скоростью, пропорциональной количеству съеденного. Получаем уравнение

$$dN_2/dt = -k_2N_2 + \alpha_{21}N_1N_2 \quad (2)$$

где  $\alpha_{21}$  – степень влияния 1-го вида на 2-й.

Система уравнений (1) и (2) явно решается, но нам достаточен качественный вид решения. Оказывается, что через каждую точку фазовой плоскости проходит замкнутая траектория системы, которая и отражает циклические колебания численностей хищников и жертв. Это так называемые вольтеррановские циклы<sup>16</sup>. Таким образом, качественные предположения, высказанные раньше, находят себе строгое математическое воплощение, которое, впрочем, по отношению к конкретным существующим в природе системам верно ровно настолько, насколько в конкретном случае верна модель (1) – (2).

Для получения на наглядном уровне строгости уравнений модели хищник – жертва достаточно было обратиться к элементарному молекулярно-кинетическому представлению о пропорциональности произведению  $N_1N_2$  для вероятности встречи хищника и жертвы. Представление это, впрочем, столь же элементарно, сколь и неверно, так как если хищник проголодается, то он начинает активно искать жертву, в том числе по каким-то оставленным ею следам, и вероятность встречи окажется гораздо большей, чем для сытого хищника, прогуливающегося ради развлечения (лишь в последнем случае реалистично молекулярно-кинетическое представление). Это соображение отчасти объясняет трудность воспроизведения вольтерровских циклов даже в лабораторных экспериментах, которые обычно кончались тем, что хищники сначала съедали всех жертв, а затем сами гибли от голода. Но попытка учета в математической модели степени голода хищников ведет к таким усложнениям,

которые делают явно нереалистичной всякую мысль о сопоставлении подобных усложненных моделей с действительностью. Таким образом, простейшая вольтеррановская модель с ее незначительными вариациями остается в списке научной классики.

### *Модель конкуренции двух видов*

Что же касается модели межвидовой конкуренции, то даже для ее простейшего объяснения на наглядном уровне приходится заглянуть в 1838 г., когда было впервые получено уравнение роста численности одновидовой популяции в ограниченной среде. Это знаменитое уравнение мальтузианского роста, т. е. роста экспоненциально быстрого (либо в геометрической прогрессии от поколения к поколению). Сам Мальтус полагал, что ресурсы, необходимые для существования вида (прежде всего, пища) тоже растут, но в арифметической прогрессии.

Первоначально уравнение для динамики численности одного вида писалось в форме

$$dN/dt = kN \quad (3)$$

Из уравнения 3 вытекает, что за время  $dt$  одна особь вида производит  $kdt$  себе подобных. Так или иначе, но в действительности мальтузианского роста не происходит. В течение XIX в. ряд ученых поправили уравнение (3), чтобы сделать его соответствующим действительности. При этих поправках речь шла вообще об ограниченных ресурсах среды, которые не растут даже и в арифметической прогрессии. Считается, что имеется некоторая конечная емкость среды  $K$ , равная максимально возможной численности данного вида в определенных условиях. При принятии этих условий, уравнение (3) заменяется следующим уравнением:

$$dN/dt = kN(1 - N/K) = kN[(K - N)/K] \quad (4)$$

Иными словами, вводится представление о том, что логарифмическая скорость роста  $N^{-1}(dN/dt)$  линейно снижается с возрастанием  $N$ . Уравнение (4) с начальным условием  $N(0) = n$  без труда решается явно. Качественная картина состоит в том, что небольшая в начале опыта численность вида монотонно возрастает по гладкой кривой. Это так называемый *логистический* рост.

Логистическая кривая асимптотически приближается к максимально возможному значению  $K$ . Не так просто воспроизвести в эксперименте логистический рост. Обеспечить постоянное количество пищи в замкнутой лабораторной среде несложно, но загрязнение среды метаболитами растущей популяции превратило бы ее из среды с постоянными возможностями для жизни вида в среду с ухудшающимися возможностями. Поэтому без дополнительных мер численность вида сначала растет по кривой обычно близкой к логистической, а затем падает до нуля. Если желательно воспроизвести именно логистический рост, то производят периодическую смену среды обитания, а более совершенной технологией являются так называемые проточные среды, в которых обновление состава среды производится непрерывно (это возможно, конечно, в том случае, когда среда обитания является жидкой). Когда говорят о логистическом росте в естественных условиях, хотят сказать, что за счет деятельности всей экосистемы данному виду обеспечиваются примерно постоянные во времени условия существования.

Модель конкуренции двух видов, которая непосредственно обобщает логистическую модель, казалась бесценным подарком теоретиков. Предположим, что имеются два вида, способные жить в какой-то определенной среде, причем каждый из них в отсутствие другого размножается по ло-

гистическому уравнению (4). Имеются, следовательно, два уравнения:

$$dN_i/dt = k_i N_i (1 - N_i/K_i) = k_i N_i [(K_i - N_i)/K_i], \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

Предположим, что при совместном выращивании двух видов в данной среде действие их друг на друга сводится к тому, что один вид потребляет часть ресурсов другого вида. Это означает, что в соответствующей модели следует вместо множителя  $1 - N_i/K_i$ , входящего в уравнения (5) в качестве фактора исчерпания ресурсов среды, подставить множитель  $1 - (N_i + \sigma_{ij} N_j)/K_i$ .

Иными словами, в качестве модели конкуренции двух видов появляется система уравнений:

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= k_1 N_1 (1 - (N_1 + \alpha_{12} N_2)/K_1); \\ dN_2/dt &= k_2 N_2 (1 - (N_2 + \alpha_{21} N_1)/K_2). \end{aligned} \quad (6)$$

Система (6) мыслится как общее описание взаимодействия двух видов, живущих в одной среде обитания. В свете этой системы появляются увлекательные возможности для умозрительных рассуждений о том, какие взаимодействия между видами вообще могут быть. Например, если  $\alpha_{12} > 0$  и  $\alpha_{21} > 0$ , т. е. виды мешают друг другу размножаться, то это — конкуренция. Но вдруг окажется, что  $\alpha_{12} < 0$  и  $\alpha_{21} < 0$ , т. е. виды помогают друг другу размножаться. Тогда это симбиоз. Есть еще другие возможности: одна константа взаимодействия положительна, другая — отрицательна (равна нулю) и т. д. За рассмотрением всех этих возможностей постепенно отходит на второй план вопрос, действует ли в каких-то конкретных условиях система (6) с какими-нибудь значениями коэффициентов.

Например, логистическая модель динамики численности вида применяется в ситуации, когда имеется вылов, сокра-

щающий численность популяции. Оказывается, что если оптимизировать квоту вылова (желать выловить побольше), то популяция выводится на грань гибели, которая и последует вскоре от действия каких-то случайных и не учтенных моделью причин.

Обратимся теперь к экспериментальным исследованиям, которые имели целью установить, что реально происходит в таких лабораторных экосистемах, которые создавались с ориентацией на теоретические модели взаимодействий по типу хищник – жертва либо конкуренции.

Знаменитый Гаузе (теорема Гаузе или закон конкурентного исключения Гаузе является одним из основных законов экологии) экспериментировал с дрожжами и инфузориями<sup>17</sup>. В отношении его опытов с хищниками и жертвами достаточно сказать кратко, что сопоставление с вольтеррановскими циклами не удалось (хищники и жертвы слишком быстро погибали). Сам исследователь делал вывод, что в экспериментах происходит не то, что предписывается моделью. В отличие от системы уравнений хищник – жертва, система уравнений конкуренции (6) в явном виде не решается. Гаузе производил ее качественное исследование. С этой целью он рассматривает уравнения изоклин. Вообще изоклиной в теории автономных дифференциальных уравнений называется кривая, на которой постоянен наклон интегральных кривых:  $dN_2/dN_1 = \text{const}$ . Но в экологии изоклинами называются частный случай общего понятия – кривые, на которых либо  $dN_1/dt = 0$ , либо  $dN_2/dt = 0$ .

Для системы (6) такими изоклинами являются прямые линии:

$$N_1 + \alpha_{12}N_2 = K_1, \alpha_{21}N_1 + N_2 = K_2$$

Гаузе изучал различные случаи расположения этих изоклин на фазовой плоскости  $((N_1, N_2): N_1 > 0, N_2 > 0)$  и

определял знаки правых частей уравнений (6) в тех участках, на которые фазовая плоскость делится изоклинами. Рассматривая качественное поведение траекторий системы, он заметил, что в большинстве случаев взаимного расположения изоклин поле направлений устроено таким образом, что либо  $N_1(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ , либо  $N_2(t) \rightarrow 0$  при  $t \rightarrow \infty$ . Это означает, что в результате конкуренции один вид вытесняется другим.

Есть один случай, когда, во-первых, изоклины пересекаются и, во-вторых, между параметрами системы (6) выполняются некоторые неравенства (не очень интересные, и мы их не выписываем), так что в результате точка пересечения изоклин оказывается точкой устойчивого равновесия. В этом случае при  $t \rightarrow \infty$  точка  $(N_1(t), N_2(t))$  стремится к точке пересечения изоклин, что содержательно означает установление устойчивого равновесия между численностями видов. Но такая ситуация возможна лишь при ряде ограничений на параметры системы (6), т. е. при произвольных значениях параметров представляется сравнительно маловероятной в сравнении со случаем вытеснения одного вида другим. В таком виде в оригинальном тексте приводится утверждение, которое впоследствии получило название теоремы Гаузе. В экспериментах Гаузе условие конкурентного вытеснения не выполнялось, а устанавливалось равновесие между видами (подбирая соответствующие виды инфузорий, их начальную концентрацию, количество пищи и т. д.). Случай конкурентного вытеснения ему, как и другим экологам, казался малоинтересным.

В чем примерно состоит биологический эксперимент по исследованию конкуренции? Подбираются два близких вида, которые, вероятно, в соответствующих условиях (некоторый недостаток пищи) будут конкурировать. Однако,

чтобы система (6) вообще могла быть применимой, следует обеспечить определенное постоянство среды обитания. Для этого пробирки с культурами видов и средой каждые сутки центрифугируются, живые организмы осаждаются, а среда сливается и заменяется новой. Наконец, нужно периодически пересчитывать особи одного и другого вида. С этой целью перед центрифугированием среда перемешивается, определенная часть ее объема (скажем,  $m = 1/10$ ) изымается и находящиеся в ней особи пересчитываются. В опытах Гаузе эти особи обратно не возвращались, а в уравнения конкуренции вводился очевидный поправочный член, учитывающий изъятие десятой части особей. Пересчет представляет собой основные затраты труда экспериментатора: в отобранной пробе могут быть сотни особей, а если это инфузории, то они еще и бегают под биноклем. Один эксперимент продолжается 2–3 недели, причем его желательно делать в нескольких повторениях, а пересчет особей делается каждые сутки. Таким образом, общий объем работы очень велик, а ведь надо еще и обработать и как-то осмыслить результаты множества подсчетов численностей, чтобы сопоставить с предсказаниями системы (6), ради которой все и началось.

# 3

## Количественная оценка многофакторных воздействий в экологическом моделировании

---

Оценка состояния водных экосистем и их антропогенных изменений может производиться как по абиотическим параметрам, так и по биотическим. При этом могут быть применены следующие основные подходы:

- использование только абиотических параметров;
- использование только биотических параметров (биоиндикация и биотестирование);
- интегральных показателей.

Каждый подход имеет свои достоинства и ограничения. Параметрический подход с использованием системы предельно допустимых концентраций (ПДК) критикуется за субъективность результатов нормирования, недоучет особенностей конкретных экосистем, при этом игнорируются косвенные последствия воздействия на экосистемы и человека. Несоответствие количества нормируемых факторов их реальному разнообразию в окружающей среде пытаются

преодолеть методами биотестирования и биоиндикации. Однако эти методики требуют продолжительных наблюдений и экспериментов, и зачастую не удается выделить лимитирующий фактор или группу факторов. Каждый из показателей качества воды в отдельности, хотя и несет информацию о качестве воды, все же не может служить мерой качества воды, так как не позволяет судить о значениях других показателей, хотя иногда косвенно бывает связан с некоторыми из них. Например, увеличенное, по сравнению с нормой, значение биохимического потребления кислорода (БПК) косвенно свидетельствует о повышенном содержании в воде легкоокисляющихся органических веществ, а увеличенное значение электропроводности – о повышенном содержании. Вместе с тем результатом оценки качества воды должны быть некоторые интегральные показатели, которые охватывали бы основные показатели качества воды (либо те из них, по которым зафиксировано неблагополучие). Основной проблемой при разработке интегральных параметров является учет взаимодействия экологических факторов при многофакторном анализе. Взаимовлияние даже в двухкомпонентной системе может быть аддитивным (в этом случае возможна простая суммация), антагонистическим (взаимоисключение), сенсibiliзирующим (ослабление влияния наиболее трудно учитывается) и синергический эффект (взаимное усиление влияния), соответственно для многокомпонентной системы расчетная задача представляет серьезную проблему. В простейшем случае, при наличии результатов по нескольким оцениваемым показателям, может быть рассчитана сумма приведенных концентраций компонентов, т. е. отношение их фактических концентраций к ПДК (правило суммации).

### *Интегральная и комплексная оценка качества воды*

Критерием качества воды при использовании правила суммации является выполнение неравенства:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_{\phi i}}{ПДК_i} \leq 1$$

где  $C_{\phi i}$  – фактическая концентрация компонента  $i$  в воде и ПДК для  $i$ -го компонента

Следует отметить, что сумма приведенных концентраций может рассчитываться только для химических веществ с одинаковым лимитирующим показателем вредности – органолептическим и санитарно-токсикологическим, так как только в этом случае их действие может приниматься строго аддитивным.

При наличии результатов анализов по достаточному количеству показателей можно определять классы качества воды, которые являются интегральной характеристикой загрязненности поверхностных вод. Классы качества определяются по индексу загрязненности воды (ИЗВ), который рассчитывается как сумма приведенных к ПДК фактических значений шести основных показателей качества воды по формуле:

$$\text{ИЗВ} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i} / 6,$$

где  $C_i$  – среднее значение определяемого показателя за период наблюдений (при гидрохимическом мониторинге это среднее значение за год);

$ПДК_i$  – предельно-допустимая концентрация для данного загрязняющего вещества;

6 – число показателей, берущихся для расчета в данном случае.

Значение ИЗВ рассчитывают для каждого пункта отбора проб (створа) и по табл. 1 в зависимости от значения ИЗВ определяют класс качества воды.

Таблица 1

### Характеристики интегральной оценки качества воды

ИЗВ	Класс качества воды	Оценка качества (характеристика) воды
Менее и равно 0,2	I	Очень чистые
Более 0,2-1	II	Чистые
Более 1-2	III	Умеренно загрязненные
Более 2-4	IV	Загрязненные
Более 4-6	V	Грязные
Более 6-10	VI	Очень грязные
Свыше 10	VII	Чрезвычайно грязные

В число шести основных, так называемых лимитируемых показателей, при расчете ИЗВ входят в обязательном порядке концентрация растворенного кислорода и значение БПК<sub>5</sub>, а также значения еще четырех показателей, являющихся для данного водоема (воды) наиболее неблагоприятными, или которые имеют наибольшие приведенные концентрации.

Таковыми показателями, по опыту гидрохимического мониторинга водоемов, нередко бывают следующие: содержание нитратов, нитритов, аммонийного азота (в форме органических и неорганических аммонийных соединений), тяжелых металлов – меди, марганца, кадмия и др., фенолов, пестицидов, нефтепродуктов, ПАВ, лигносульфонатов. Для

расчета ИЗВ показатели выбираются независимо от лимитирующего признака вредности, однако при равенстве приведенных концентраций предпочтение отдается веществам, имеющим санитарно-токсикологический признак вредности (как правило, такие вещества обладают относительно большей вредностью).

Очевидно, не все из перечисленных показателей качества воды могут быть определены полевыми методами. Задачи интегральной оценки осложняются еще и тем обстоятельством, что для получения данных при расчете ИЗВ необходимо проводить анализ по широкому кругу показателей, с выделением из их числа тех, по которым наблюдаются наибольшие приведенные концентрации. При невозможности проведения гидрохимического обследования водоема по всем интересующим показателям целесообразно определить, какие же компоненты могут быть загрязнителями. Это делают на основе анализа доступных результатов гидрохимических исследований прошлых лет, а также сведений и предположений о вероятных источниках загрязнений воды. При невозможности выполнения анализов по данному компоненту полевыми методами (СПАВ, пестициды, нефтепродукты и др.), следует произвести отбор проб и их консервацию с соблюдением необходимых условий, после чего доставить пробы в требуемые сроки для анализа в лабораторию.

Таким образом, задачи интегральной оценки качества воды практически совпадают с задачами гидрохимического мониторинга, так как для окончательного вывода о классе качества воды необходимы результаты анализов по целому ряду показателей в течение продолжительного периода.

*К недостаткам приведенного способа интегральной оценки качества воды, несмотря на его широкое распространение на практике, можно отнести следующее.*

- Во-первых, учет изолированного действия отдельных химических веществ или их групп недостаточен для оценки фактической экологической ситуации в водоеме либо чистоты питьевой воды.

- Во-вторых, многие загрязняющие вещества, не вошедшие в группу из шести лимитированных показателей, выпадают из внимания исследователей. В их числе могут быть и те показатели, по которым имеется превышение ПДК, а также и те, по которым ПДК не превышены.

- В-третьих, в результате взаимодействия многих химических компонентов в воде, даже при их малых концентрациях, могут образовываться соединения, значительно более токсичные, чем исходные. Кроме того, совместное присутствие в воде некоторых токсичных веществ приводит к увеличению их токсичности (явление синергизма).

- В-четвертых, (и это может быть самым существенным недостатком приведенного метода интегральной оценки качества воды), определение ИЗВ предполагает контроль только по гидрохимическим показателям, при этом из поля зрения исследователей ускользают микробиологические показатели, которые имеют часто решающее значение при оценке пригодности воды для нужд пищевого и бытового использования.

Указанные недостатки интегральной оценки качества воды сводятся к минимуму при включении в «арсенал» методов мониторинга гидробиологических методов, например метода биоиндикации по Вудвиссу, методов биотестирования. Вместе с тем, как уже отмечалось, интегральная оценка качества воды посредством расчета ИЗВ практически повсеместно используется специалистами в нашей стране при экологических и гидрохимических исследованиях, а ее

результаты, как правило, хорошо сходятся с результатами гидробиологических наблюдений.

Интересным является подход к оценке качества воды, разработанный Национальным Санитарным Фондом США с использованием стандартного обобщенного показателя качества воды (ПКВ). При разработке ПКВ использовались экспертные оценки на основе большого перечня оценочных характеристик качества воды при ее использовании для целей бытового и промышленного водопотребления, отдыха на воде (плавания и водных развлечений, рыбалки), охраны водных животных и рыб, сельскохозяйственного использования (водопоя, орошения), коммерческого использования (судоходства, гидроэнергетики, теплоэнергетики) и др.

ПКВ является безразмерной величиной, которая может принимать значения от 0 до 100. В зависимости от значения ПКВ возможны следующие оценки качества воды: 100–90 – превосходное; 90–70 – хорошее; 70–50 – посредственное; 50–25 – плохое; 25–0 – очень плохое. Установлено, что минимальное значение ПКВ, при котором удовлетворяется большинство государственных стандартов качества воды, составляет 50–58. Однако вода в водоеме может иметь значение ПКВ больше указанного, и в то же время не соответствовать стандартам по каким-либо отдельным показателям.

ПКВ рассчитывается по результатам определения девяти важнейших характеристик воды – частных показателей, причем каждый из них имеет собственный весовой коэффициент, характеризующий приоритетность данного показателя в оценке качества воды. Частные показатели качества воды, используемые при расчете ПКВ, и их весовые коэффициенты приведены в табл. 2.

**Весовые коэффициенты показателей при расчете ПКВ**

<b>Показатель</b>	<b>Значение весового коэффициента</b>
Растворенный кислород	0,17
Количество кишечных палочек	0,16
Водородный показатель (рН)	0,11
Биохимическое потребление кислорода (БПК <sub>5</sub> )	0,11
Температура (At, тепловое загрязнение)	0,10
Общий фосфор	0,10
Нитраты	0,10
Мутность	0,08
Сухой остаток	0,07
Сумма	1,00

Как следует из приведенных в табл. 2 данных, наиболее весомыми показателями являются растворенный кислород и количество кишечных палочек, что вполне понятно, если вспомнить важнейшую экологическую роль растворенного в воде кислорода и опасность для человека, обусловленную контактом с загрязненной фекалиями водой.

Кроме весовых коэффициентов, имеющих постоянное значение, для каждого отдельного показателя разработаны весовые кривые, характеризующие уровень качества воды (Q) по каждому показателю в зависимости от его фактического значения, определяемого при анализе. Графики весовых кривых приведены на рис. 5. Имея результаты анализов по частным показателям, по весовым кривым определяют численные значения оценки для каждого из них. После-

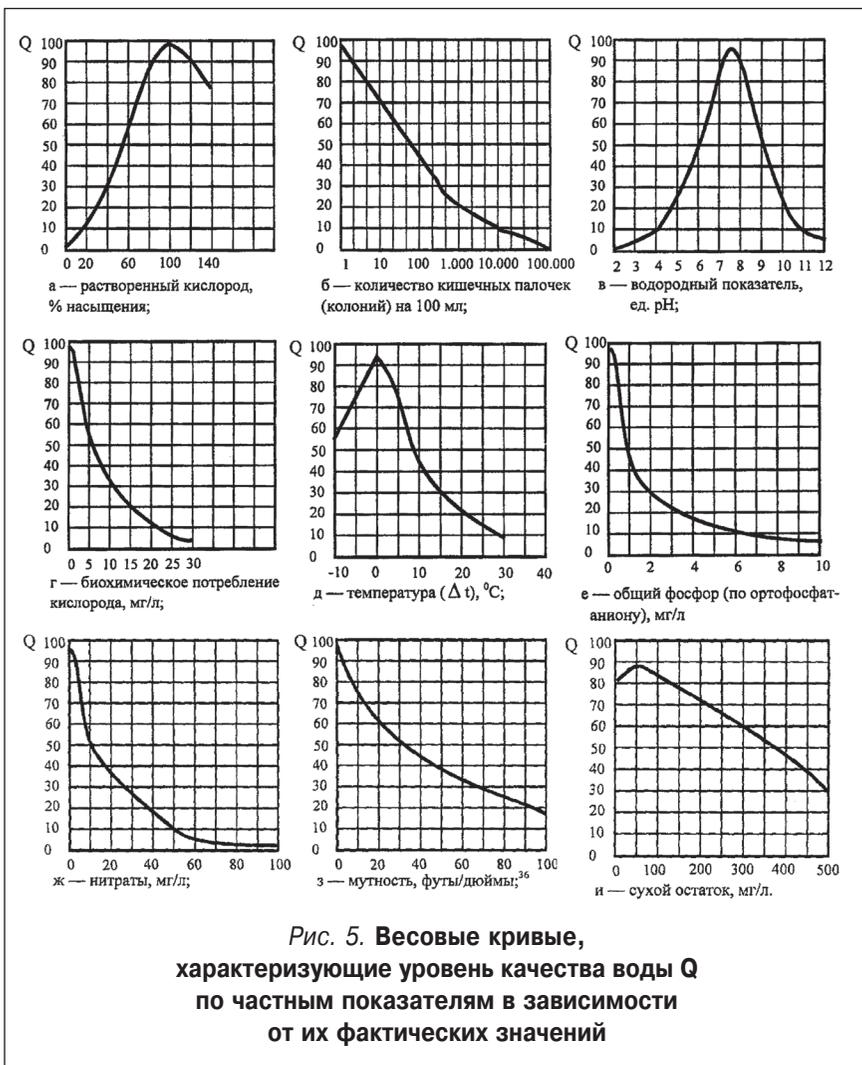
дни умножаются на соответствующий весовой коэффициент, и получают оценку качества по каждому из показателей. Суммируя оценки по всем определенным показателям, получают значение обобщенного ПКВ.

Обобщенный ПКВ в значительной степени устраняет недостатки интегральной оценки качества воды с расчетом ИЗВ, так как содержит группу конкретных приоритетных показателей, в число которых входит показатель микробного загрязнения.

При оценке качества воды, кроме интегральной оценки, в результате которой устанавливается класс качества воды, а также гидробиологической оценки методами биоиндикации, в результате которой устанавливается класс чистоты, иногда встречается также так называемая комплексная оценка, основу которой составляют методы биотестирования. Последние относятся также к гидробиологическим методам, но отличаются тем, что позволяют определить реакцию водной биоты на загрязнения по различным тестовым организмам – как простейшим (инфузориям, дафниям), так и высшим – рыбам (гуппиям). Такая реакция иногда считается наиболее показательной, особенно применительно к оценке качества загрязненных вод (природных и сточных) и позволяет определять даже количественно концентрации отдельных соединений.

Обычно при биотестировании устанавливают количественные градуировочные зависимости показателей смертности тестовых организмов или каких-либо изменений в них, либо поведенческих реакций, от концентрации ионов тяжелых металлов. Токсические эффекты на организмы выражают в концентрациях, эквивалентных концентрациям тяжелых металлов. Следует отметить, что исследования, выполняемые при комплексной оценке качества воды,

не ограничиваются только методами биотестирования, они обязательно включают (особенно при анализе питьевой и природной вод) гидрохимические методы и методы биоиндикации.



# 4

## Практические работы «Моделируем и изучаем экосистемы»

---

### 4.1. Создание и поддержание искусственной экосистемы аквариума

*Выполнив данную работу, вы научитесь:*

- *создавать искусственную экосистему;*
- *определять ее основные структурные компоненты;*
- *понимать роль каждого компонента экосистемы.*

**Ход работы:**

1. Поместите плодородную почву слоем 5 см в широкогорлый стеклянный сосуд емкостью 3–4 л. Сверху насыпьте тонкий слой речного песка (предварительно прокаленного). Накройте грунт листом бумаги.

2. Наполните сосуд водой из-под крана, отстоявшейся не менее суток, чтобы выветрился остаточный хлор (присутствует в воде, прошедшей стадию очистки – хлорирование) и установилось температурное равновесие с окружающей средой.

3. Осторожно вытащите бумагу, стараясь избегать перемешивания.

4. Осторожно посадите в почву три–четыре веточки элодеи и других водных растений, поместите в сосуд несколько улиток и двух *гуппи*.

5. Поставьте этот аквариум в достаточно освещенное место.

6. В течение 6–10 недель, наблюдая за аквариумом, делайте записи с учетом поставленных выше целей.

7. Составьте отчет о наблюдениях, в котором отразите:

- изменения, происходящие с отдельными структурными компонентами экосистемы в результате их взаимодействия и взаимовлияния;
- роль структурных компонентов экосистемы в установлении динамического равновесия;
- биотические и абиотические факторы, действующие в данной экосистеме;
- анализ результатов наблюдений в рамках общей проблемы сохранения устойчивости экосистем.

## 4.2. Построение блок-схемы экосистемы

*Выполнив данную работу, вы сможете:*

- *познакомиться с основными понятиями системной динамики;*
- *научиться определять основные структурные компоненты моделируемой экосистемы и выявлять знак обратной связи между ними.*

**Основные понятия системной динамики.** Чтобы наиболее полно представить систему, необходимо установить границы, в пределах которых осуществляются внутрисистемные взаимодействия, определяющие характер поведения систе-

мы. Границы системы выбираются таким образом, чтобы охватить те компоненты, взаимодействие которых определяет интересующие нас стороны ее поведения. Построенная модель системы в пределах избранных границ должна быть способной сама генерировать любую ситуацию, которую, возможно, потребует проанализировать (принцип замкнутости). Этот принцип означает, что поведение исследуемой системы не навязывается ей извне, а создается внутри ее границ. Замкнутость системы не исключает подверженность системы экзогенным воздействиям, но предполагает, что их можно рассматривать хотя и влияющими на систему, но не определяющими ее внутренний рост и стабильность характеристик.

Структура модели в системной динамике представляется с помощью *потоков* двух видов: *материальных* и *информационных*. Динамика поведения системы определяется цепями обратной связи. Каждая цепь обратной связи описывается переменными двух видов, называемых уровнем (*LEVEL*) и темпом (*RATE*). На рис. 6 схематически показана структура простейшей цепочки обратной связи: сплошной стрелкой показано направление материального потока, пунктирной – направление информационного потока. Переменная «уровень» схематически изображена в виде прямоугольника, переменная «темп» – в виде вентиля, регулирующего скорость материального потока. Значок, изображенный в виде облака, означает источник (в иных случаях может быть сток) материального потока и указывает на то, что этот источник (сток) лежит вне границ рассматриваемой системы и для модели несущественен.

Изменения уровней определяются только темпами потока. Переменные темпов потока, в свою очередь, зависят только от информации об уровнях. Ни один темп не может

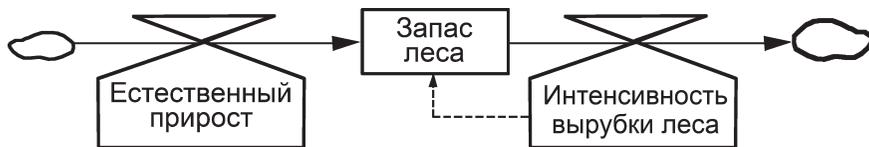


Рис. 6. ДИНАМО-диаграмма зависимости запаса леса от естественного прироста и интенсивности его вырубki

непосредственно воздействовать на другой, как и уровень не может непосредственно воздействовать на другой уровень. Один уровень воздействует на другой только через темп потока. Таким образом, проходя по любой цепочке системы, мы столкнемся с чередованием уровней и темпов, нигде не встретив подряд две переменные одного вида. Укажем, что в приведенной ниже модели в качестве переменных уровня используются уровни загрязнений, запас леса, мощность предприятия. В качестве переменных темпа используются интенсивность лесонасаждений и скорость распада загрязнений.

Следует иметь в виду, что все уровни одной сети в материальных потоках должны иметь одноименное содержание. Входящие и исходящие потоки, связанные с уровнем, переносят предметы того же вида, что и содержащиеся в уровнях. Предметы одного вида не должны передаваться уровням, содержащим другой вид. Информационные потоки могут идти от уровня любой сети к темпу той же самой или другой сети. Этим информационная сеть отличается от сети любого материального потока.

*Временная задержка.* Реальные системы характеризуются задержками как в информационных, так и в материальных потоках. В системной динамике задержки характеризуют процесс преобразования, в результате которого на основе заданного темпа входящего потока устанавливается

темп потока на выходе (например, интенсивность лесопосадок не сразу сказывается на уровне промышленного запаса леса, а с некоторой задержкой, равной периоду, который необходим для созревания высаженного леса).

Запаздывания характерны для сложных систем, поэтому в системной динамике вводится специальная процедура *DELAY*, которая служит для указания того, что влияние темпа на уровень осуществляется с некоторой временной задержкой. Для характеристики запаздывания представляют интерес два параметра.

Первый – *длительность времени D*, выражающая среднее значение запаздывания. Этот параметр полностью характеризует «установившееся запаздывание», при котором темпы входного и выходного потоков равны. При установившихся условиях темп входного потока, помноженный на длительность запаздывания, определяет количество вещества, находящееся в запаздывании. Вторым параметром описывает «неустановившуюся реакцию», показывающую, как динамика входного потока связана с динамикой выходного при изменении во времени темпа входного потока. Этот параметр называется *порядком запаздывания*.

### Ход работы.

1. Познакомьтесь с описанием модели «загрязнение региона» на примере изучения взаимовлияния хозяйственной деятельности и загрязнения окружающей среды в пределах некоторого идеализированного абстрактного региона.

1) *Словесное описание проблемы*. Хозяйственная деятельность представлена целлюлозно-бумажным комбинатом (ЦБК), потребляющим древесину и (в качестве побочного результата функционирования) загрязняющим атмосферу и поверхностные воды. Для простоты загрязнение характеризуется неким условным «загрязнителем», общим для воздуха и воды.

Предполагается, что вначале мощность ЦБК наращивалась с некоторым постоянным темпом (был принят 10% - ный ежегодный прирост мощности ЦБК), что приводит к уменьшению лесных запасов (спелого леса) и росту загрязнения окружающей среды; для простоты считается, что рост загрязнений пропорционален мощности ЦБК. Для восстановления лесных запасов проводятся мероприятия по лесонасаждению, что, однако, дает эффект с определенной временной задержкой; было принято, что в среднем за 50 лет лес становится спелым. Ввиду уменьшения лесных запасов, а также из-за сдерживающего влияния загрязнений наращивание мощности ЦБК замедляется.

Ставится задача: определить динамику взаимосвязанных переменных: мощности ЦБК, лесных запасов и загрязнения окружающей среды. Временной горизонт, т. е. период, на котором изучалась динамика системы, был принят равным 80 годам.

2) *Определение границ системы.* В качестве переменных, описывающих состояние системы, приняты: мощность ЦБК, уровень лесных запасов, интенсивность лесоразработок и лесопосадок, загрязнение атмосферы и поверхностных вод. Виды зависимостей, используемых в модели (например, зависимость темпа наращивания мощности ЦБК от уровня лесных запасов и загрязнения), выбирались только из соображений простоты и непротиворечия нашим интуитивным представлениям о качественном характере зависимостей. Начальное состояние системы также выбиралось почти произвольно.

3) *Выявление причинно-следственных связей в системе.* Динамика описываемой системы зависит от нескольких цепочек обратных связей. Они имеют противоположные знаки и некоторые из них не очевидны. Объем производства

продукции (бумаги) зависит от «эффективного капитала», который капитал определяется объемом вложенного капитала и загрязнением поверхностных вод. На рис. 7 представлена диаграмма причинно-следственных связей рассматриваемой модели, на которой отражен тот факт, что рост загрязнения воды приводит к уменьшению эффективности производства. Изменяя значения констант и табличных функций модели возможно «проиграть» множество вариантов развития событий во времени.



Рис. 7. Диаграмма причинно-следственных связей модели

Изучая опасность крупномасштабного загрязнения, следует отметить одну принципиальную трудность – различие временных масштабов изучаемых процессов. Например, часто возникает необходимость учета пространственной неоднородности в распределении загрязнений. Основным переносчиком загрязнений служат атмосфера и природные воды. Характерное время процессов, которые определяют перенос загрязнений, составляет величину от нескольких минут до нескольких десятков часов. В то же время, например, динамика некоторых антропогенных воздействий, ответная реакция экосистем могут характеризоваться несколько месяцев и даже лет. Поэтому при расчетах по моделям такого рода иногда приходится использовать очень мелкий временной шаг.

2. Постройте блок-схему описанной выше интегрированной модели. Обозначьте на схеме все взаимосвязанные параметры экосистемы и знаки обратной связи.

### 4.3. Изготовление модели – мобиля

Изготавливаемый мобиль сочетает в себе элементы наглядности, активизирует образное мышление и прост в изготовлении. Работа может выполняться как индивидуально, так и в группе, при распределенном задании. Освоенную методику можно применить для изготовления дидактического материала к педагогической практике.

*Предлагаемая методика, несмотря на свою кажущуюся простоту, позволяет показать:*

- *многомерность и сложность экосистемы;*
- *хрупкость и одновременно устойчивость равновесия;*
- *сущность законов экологии Б. Коммонера;*
- *экологическую нишу вида;*
- *связи в пищевой цепи.*

## Ход работы.

Изготовьте две подвижных модели – мобилия:

1. Биоценоз пресного водоема.
2. Пищевая цепь.

Материалы: иллюстративный материал, две длинных и две коротких палочки, нитки, иголка, плотная бумага, простой карандаш, по выбору цветные карандаши, краски, фломастеры, клей и клейкая лента.

*Мобиль «Биоценоз пресного водоема»* состоит из четырех подвесок с главными элементами: «солнце», «куст», «цветок», «трава». К подвескам прикрепляются другие элементы: птица, стрекоза, лягушка, моллюск, рыба, комар, головастик и т. д.

Главные элементы подвесок выполняются из плотной бумаги, раскрашиваются, вырезаются, складываются вдвое (остальные элементы одинарные). Внутрь двойных элементов продеваются палочки: длинные – в «солнце» и «цветок», короткие – в «куст» и «траву».

Конструкция мобилия собирается на столе, согласно рис. 8. Все элементы должны свободно передвигаться вдоль палочек. Затем иголкой с ниткой соединяются все элементы мобилия таким образом, чтобы, вращаясь, они не задевали друг друга.

Теперь мобиль можно подвесить на прочной нитке, а затем, передвигая вдоль палочек «солнце», «куст», «цветок», «траву», уравновесить конструкцию, т. е. добиться горизонтального положения каждой из палочек.

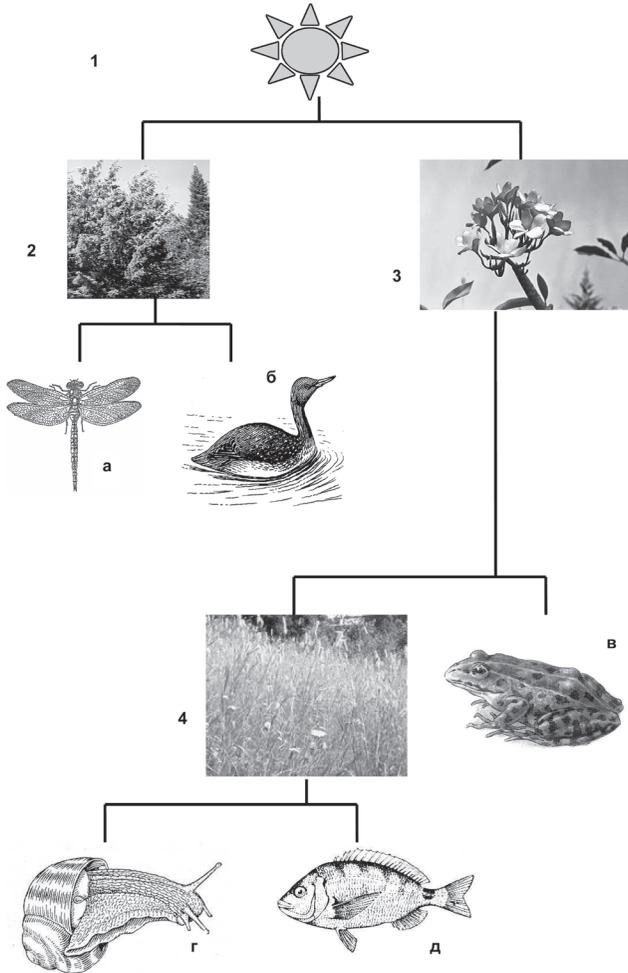


Рис. 8. **Схема сборки мобиля «Биоценоз пресного водоема»**

Можно использовать любой иллюстративный материал или нарисовать картинки самостоятельно.

*Двойные элементы:* 1 – подвеска «Солнце», 2 – подвеска «куст», 3 – подвеска «цветок», 4 – подвеска «трава».

*Одинарные элементы:* а) стрекоза, б) птица, в) лягушка, г) моллюск, д) рыбка.

Мобиль «Пищевая цепь» состоит из фигурок рыбки, рачка-циклопа, рачка-гаммаруса (бокоплава).

Схема сборки мобиля «Пищевая цепь» представлена на рис. 9.

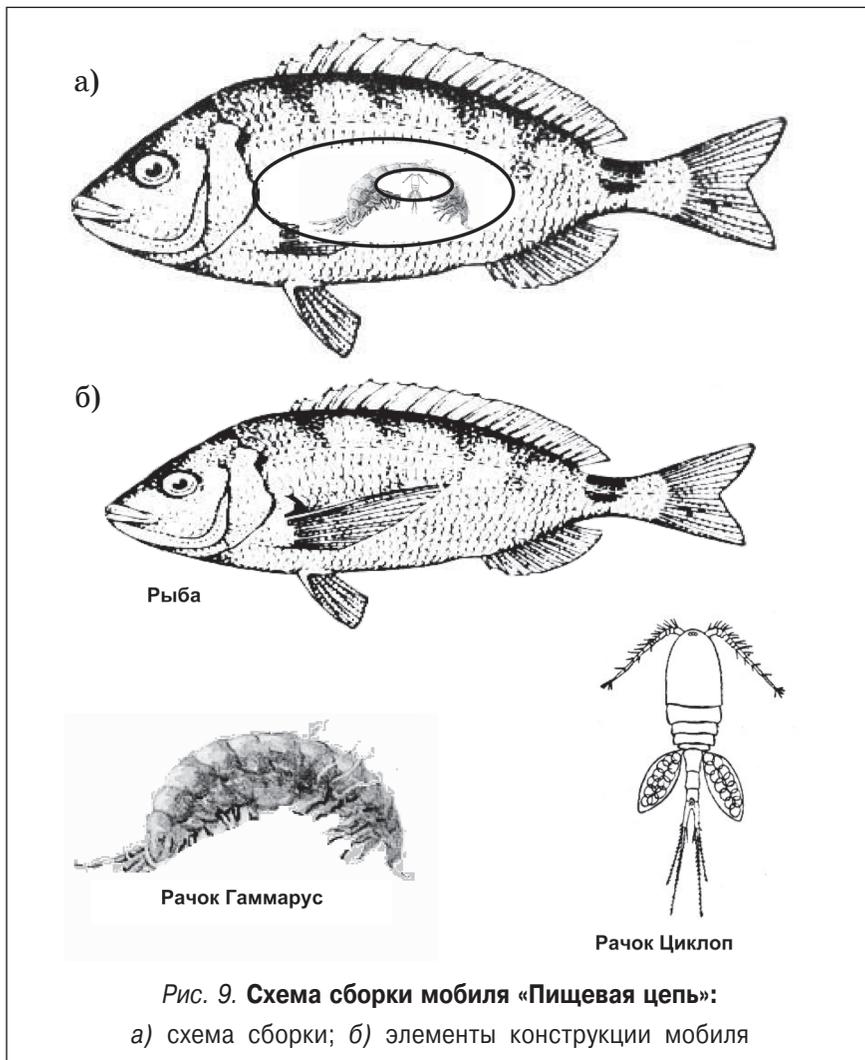


Рис. 9. Схема сборки мобиля «Пищевая цепь»:  
а) схема сборки; б) элементы конструкции мобиля

Нарисовать или найти соответствующие иллюстрации, соблюдая предложенные пропорции.

Внутри вырезанных фигурок рыбы и рачка-гаммаруса вырезать овалы, на которых нарисовать или приклеить фигурки гаммаруса и рачка-циклопа, соответственно.

Продеть иголку с ниткой через кружочек на овале с циклопом, затем через два кружочка на овале с гаммарусом. При правильной сборке циклоп оказывается внутри гаммаруса. То же самое проделать с овалами гаммаруса и рыбы.

*Дополнительное задание.*

Разработайте мультимедийную программу по собственному сценарию средствами Acrobat, Power Point, Flash, Director, Dreamware и др.

Такие обучающие презентации вы сможете использовать для сопровождения уроков теоретическим и иллюстративным материалом.

#### 4.4. Дидактическая игра «Круговорот углерода»

*Выполнив данную работу, вы сможете:*

- *изучить биогеохимический круговорот углерода;*
- *в игровой форме проследить перемещение гипотетического атома углерода из атмосферы через биотические и абиотические компоненты наземных экосистем обратно в атмосферу.*

Материалы: игровое поле (вы можете использовать готовое или творчески его преобразить, добавив иллюстрации и химические формулы соединений), фишки (или любые мелкие предметы), две монеты.

*Ход игры.*

Игровое поле представлено на рис. 10. В игре могут принимать участие несколько человек.

Начинайте игру расставив фишки, представляющие атомы углерода, на позиции 1 (диоксид углерода в атмосфере).

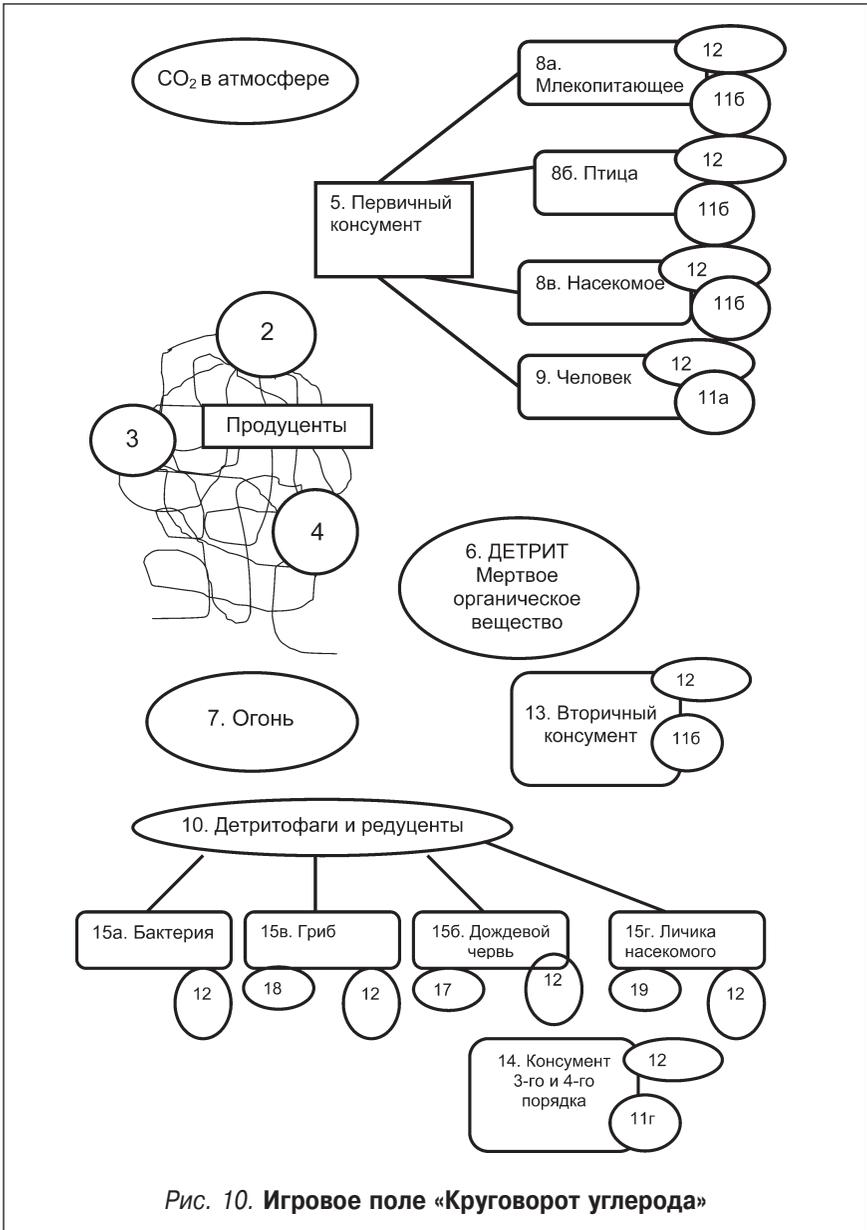


Рис. 10. Игровое поле «Круговорот углерода»

По очереди подбрасывая монеты, продвигайте ваш «атом углерода» в соответствии с выпавшей комбинацией, описанной в приводимой ниже инструкции. Прежде чем продвигаться дальше, дождитесь своей очереди, если инструкция не предусматривает иное. Обратите внимание, что перемещение фишек (атомов) не соответствует порядку номеров, а происходит случайно в зависимости от того, как упадут монеты. Фишки двух или более игроков могут занимать одну и ту же позицию одновременно. Когда ваш «атом» возвратится в атмосферу – один цикл углерода завершен. Вы можете продолжить игру, начав следующий цикл.

Каждый игрок должен записывать путь своей фишки в каждом цикле. Нумеруйте эти циклы – 1, 2, 3 и т. д. Каждый, кто получит ясное представление о непрерывном круговороте атомов углерода в биосфере, уже выиграл. Но если вы играете «на интерес», то победителем может стать тот, чей атом углерода:

- 1) «посетил» максимум различных организмов;
- 2) совершил больше циклов;
- 3) прошел самый длинный цикл;
- 4) больше всего времени провел в атмосфере.

#### **Инструкция (пункты соответствуют номерам позиции)**

Условные обозначения: ОО – два орла, ОР – орел и решка, РР – две решки.

#### **1. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ МОЛЕКУЛЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА ( $\text{CO}_2$ ), НАХОДЯЩЕГОСЯ В АТМОСФЕРЕ.**

*Подбросьте две монеты.*

Если выпало ОО – Атом углерода не поглощается растением и остается в атмосфере до следующего хода.

Если выпали комбинации ОР или РР – атом углерода поглощается листьями растения в процессе фотосинтеза.

**Переход на позицию 2.**

## 2. МОЛЕКУЛА $\text{CO}_2$ С ВАШИМ УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ НАХОДИТСЯ В ЛИСТЕ РАСТЕНИЯ.

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО означает, что солнечный свет отсутствует и фотосинтез не происходит, поэтому молекула  $\text{CO}_2$  с вашим углеродным атомом возвращается в атмосферу. Возвращение на позицию 1.

Комбинации ОР или РР означают, что в результате фотосинтеза ваш углеродный атом включается в молекулу сахара. Переход на позицию 3.

## 3. АТОМ УГЛЕРОДА ВКЛЮЧЕН В МОЛЕКУЛУ САХАРА В РАСТЕНИИ.

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула сахара с вашим атомом углерода окисляется в процессе клеточного дыхания, обеспечивающего растение энергией для роста. В результате этого процесса углеродный атом возвращается в составе молекулы  $\text{CO}_2$  в атмосферу. Переход на позицию 1.

Комбинация ОР или РР: молекула сахара с вашим углеродным атомом превращается в молекулу, входящую в состав ткани растения. Переход на позицию 4.

## 4. АТОМ УГЛЕРОДА ВКЛЮЧЕН В МОЛЕКУЛУ, ВХОДЯЩЮЮ В СОСТАВ РАСТИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ.

*Подбросьте монеты.*

Комбинация ОО: растение съедено животным. Переход на позицию 5. Сыграйте еще раз, чтобы определить, каким именно.

Комбинация ОР или РР: часть растения отмирает, в результате образуется мертвое органическое вещество – детрит. Переход на позицию 6.

**5. РАСТЕНИЕ С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕДЕНО ПЕРВИЧНЫМ КОНСУМЕНТОМ.**

*Подбросьте два раза одну монету.*

Комбинация ОО означает, что растение было съедено травоядным млекопитающим. Переход на позицию *8а*.

Комбинация ОР: птица. Переход на позицию *8б*.

Комбинация РО: насекомое. Переход на позицию *8в*.

Комбинация РР: человек (возможно, вы сами). Переход на позицию *9*.

**6. АТОМ УГЛЕРОДА НАХОДИТСЯ В МОЛЕКУЛЕ ДЕТРИТА.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО или ОР: детрит съеден детритофагом или редуцентом. Переход на позицию *10*. Сыграйте еще раз, чтобы определить, каким именно.

Комбинация РР означает, что случился пожар. Переход на позицию *7*.

**7. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ ОКИСЛЯЕТСЯ (СГОРАЕТ) И АТОМ УГЛЕРОДА ПОПАДАЕТ В АТМОСФЕРУ В СОСТАВЕ МОЛЕКУЛЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА.**

Немедленно возвращайтесь на позицию *1*, не делая хода.

**8а, 8б, 8в. ТКАНЬ РАСТЕНИЯ С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕЛ ПЕРВИЧНЫЙ КОНСУМЕНТ.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула с углеродным атомом в результате метаболизма вошла в состав соединения, образующего ткань тела консумента. Переход на позицию *11б*.

Комбинация ОР: клеточное дыхание! Переход на позицию *12*.

Комбинация РР: молекула с углеродным атомом не переварена, пройдя через желудочно-кишечный тракт, она вернулась в окружающую среду. Переход на позицию *6*.

## 9. ТКАНЬ РАСТЕНИЯ С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕЛ ЧЕЛОВЕК.

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула с углеродным атомом метаболизировалась, и он вошел в состав соединения, образующего ткань человеческого тела. Переход на позицию 11а.

Комбинация ОР: клеточное дыхание! Переход на позицию 12.

Комбинация РР: молекула с углеродным атомом не переварена; пройдя через желудочно-кишечный тракт, она вернулась в окружающую среду. Переход на позицию 6.

## 10. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕДЕНА ПЕРВИЧНЫМ ДЕТРИТОФАГОМ ИЛИ РЕДУЦЕНТОМ.

*Подбросьте два раза одну монету.*

Комбинация ОО: дождевой червь. Переход на позицию 15б.

Комбинация ОР: гриб. Переход на позицию 15в.

Комбинация РО: бактерия. Переход на позицию 15а.

Комбинация РР: насекомое. Переход на позицию 15г.

## 11а. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ СОЕДИНЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩЕГО ТКАНЬ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА.

*Подбросьте монету.*

Комбинация О: соединение включилось в процесс клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация Р: человек умирает и его тело кремируют. Переход на позицию 7.

## 11б. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ СОЕДИНЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩЕГО ТКАНЬ ПЕРВИЧНОГО КОНСУМЕНТА, ИЛИ ФИТОФАГА.

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: соединение включилось в процесс клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация ОР: первичный консумент съеден вторичным консументом. Переход на позицию 13.

Комбинация РР: первичный консумент погиб в борьбе или от болезни. Переход на позицию 6.

**11в. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ СОЕДИНЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩЕГО ТКАНЬ ВТОРИЧНОГО КОНСУМЕНТА (ПЛОТЯДНОГО ЖИВОТНОГО).**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: соединение включилось в процесс клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация ОР: вторичный консумент съеден консументом третьего порядка. Переход на позицию 14.

Комбинация РР: вторичный консумент погиб в борьбе или от болезни. Переход на позицию 6.

**11г. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ СОЕДИНЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩЕГО ТКАНЬ КОНСУМЕНТА ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА (ПЛОТЯДНОГО ЖИВОТНОГО).**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: соединение включилось в процесс клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация ОР: консумент третьего порядка съеден консументом четвертого порядка. Переход на позицию 14.

Комбинация РР: консумент третьего порядка погиб в борьбе или от болезни. Переход на позицию 6.

**12. МОЛЕКУЛА СОДЕРЖАЩАЯ АТОМ УГЛЕРОДА, РАСЩЕПЛЯЕТСЯ В ПРОЦЕССЕ КЛЕТОЧНОГО ДЫХАНИЯ С ВЫСВОБОЖДЕНИЕМ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ДВИЖЕНИЯ КОНСУМЕНТА. ПРИ ЭТОМ УГЛЕРОДНЫЙ АТОМ ПОПАДАЕТ В АТМОСФЕРУ В СОСТАВЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА.**

Немедленно возвращайтесь на позицию 1, не сделав хода.

### 13. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕДЕНА ВТОРИЧНЫМ КОНСУМЕНТОМ.

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула с углеродным атомом метаболирована с образованием соединения, входящего в состав ткани консумента. Переход на позицию 11в.

Комбинация ОР: клеточное дыхание! Переход на позицию 12.

Комбинация РР: молекула с углеродным атомом не переварена; пройдя через желудочно-кишечный тракт, она вышла в окружающую среду. Переход на позицию 6.

### 14. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕДЕНА КОНСУМЕНТОМ ТРЕТЬЕГО ИЛИ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА.

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула с углеродным атомом метаболлизировалась с образованием соединения, входящего в состав ткани тела консумента. Переход на позицию 11г.

Комбинация ОР: клеточное дыхание! Переход на позицию 12.

Комбинация РР: молекула с углеродным атомом не переварена; пройдя через желудочно-кишечный тракт, она вышла в окружающую среду. Переход на позицию 6.

### 15а. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ ПОГЛОЩЕНА БАКТЕРИЕЙ.

*Подбросьте монету.*

Комбинация О: Молекула включена в состав бактериальной клетки. Переход на позицию 16.

Комбинация Р: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

**15б. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕДЕНА ДОЖДЕВЫМ ЧЕРВЕМ.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула включается в состав тела червя. Переход на позицию 17.

Комбинация ОР: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация РР: молекула не переварена, пройдя через желудочно-кишечный тракт, она выходит в окружающую среду. Переход на позицию 6.

**15в. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ ПОГЛОЩЕНА ГРИБОМ.**

*Подбросьте монету.*

Комбинация О: молекула включается в состав гриба. Переход на позицию 18.

Комбинация Р: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

**15г. МОЛЕКУЛА С УГЛЕРОДНЫМ АТОМОМ СЪЕДЕНА ЛИЧИНКОЙ НАСЕКОМОГО.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула включается в состав тела насекомого. Переход на позицию 19.

Комбинация ОР: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация РР. Молекула не переварена; пройдя через желудочно-кишечный тракт, она выходит в окружающую среду. Переход на позицию 6.

**16. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ БАКТЕРИАЛЬНОЙ КЛЕТКИ.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация ОР: бактерия съедена земляным червем. Переход на позицию 15б.

Комбинация РР: бактерия погибла. Переход на позицию 6.

**17. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ ТЕЛА ЗЕМЛЯНОГО ЧЕРВЯ.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация ОР: земляного червя съела птица. Переход на позицию 8б.

Комбинация РР: земляной червь погиб от ранения или болезни. Переход на позицию 6.

**18. УГЛЕРОДНЫЙ АТОМ ВХОДИТ В СОСТАВ ГРИБА.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация ОР: гриб съеден насекомым. Переход на позицию 15.

Комбинация РР: гриб отмер. Переход на позицию 6.

**19. АТОМ УГЛЕРОДА ВХОДИТ В СОСТАВ ТЕЛА НАСЕКОМОГО.**

*Подбросьте две монеты.*

Комбинация ОО: молекула расщепляется и метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Переход на позицию 12.

Комбинация ОР: насекомое съедено мелким млекопитающим. Переход на позицию 4.

Комбинация РР: насекомое погибло от ранения или болезни. Переход на позицию 6.

---

### ВОПРОСЫ ПО ТЕМЕ «КРУГОВОРОТ УГЛЕРОДА»

---

1. В целях экономии места и времени в игре были пропущены некоторые важные пути миграции углерода. Какие? Опишите движение углерода в водных экосистемах и процесс образования ископаемого топлива.
2. Образуются ли атомы углерода на каком-либо из этапов цикла? Превращаются ли в другие атомы? Объясните.
3. В каких превращениях участвуют углеродные атомы, проходя цикл? Опишите особенности органических и неорганических углеродсодержащих соединений. Какие изменения происходят при переходе между этими веществами?
4. Почему атомы углерода из диоксида углерода не включаются в молекулу сахара в темноте?
5. Значительная часть съеденной пищи в любом организме метаболизируется в процессе клеточного дыхания. Почему? Что и как получает организм в результате?
6. Что происходит с атомами углерода в процессе дыхания? В ходе какого метаболического процесса происходит окончательное разложение органических соединений с образованием безвредных неорганических веществ?

7. Найдите данные о скоростях циркулирования атомов углерода в разных средах и при разных условиях.
8. Подумайте об одном из триллионов атомов углерода, содержащихся в молекулах вашего тела. Каким образом он попал в ваш организм? Где был до этого? Какова его гипотетическая история за последний миллиард лет?
9. Где окажется этот атом углерода в дальнейшем? Опишите его гипотетическое будущее в течение ближайших нескольких тысяч лет.
10. Цикл углерода и антропогенное загрязнение биосферы. Почему не происходит загрязнения природной экосистемы отходами различных организмов? Приведите примеры, иллюстрирующие вашу точку зрения, заполнив следующий образец:

Тип загрязнителя (привести примеры)	Источник	Как используется (сегодня или в перспективе)
Естественные загрязнения		
Антропогенные загрязнения		

#### 4.5. Выбор модельных характеристик

*Выполнив данную работу, вы сможете:*

- *изучить фактор бионакопления как одно из экохимических свойств пестицидов;*
- *понять принцип отбора модельных характеристик на примере замены фактора бионакопления на коэффициент распределения спирт/вода.*

Справочные материалы: таблица значений факторов бионакопления и коэффициента распределения для некоторых пестицидов и продуктов их распада.

Химические соединения антропогенного происхождения, как и природные компоненты, мигрируют из одной части биосферы в другую, замыкая круговорот. Серьезность проблемы химического загрязнения окружающей среды в целом и накопления токсикантов в пищевых цепях особенно наглядно демонстрируют данные о биоаккумуляции ДДТ\* – одного из супертоксичных пестицидов. История ДДТ знает такие взлеты, как присуждение Нобелевской премии его создателю, и такие падения, как полный запрет на синтез и использование. В грудном молоке современных матерей содержится примерно в 4 раза больше ДДТ и его аналогов, чем допускается санитарными нормами для коровьего молока, продающегося в магазине. Пестициды могут накапливаться в тканях живых организмов и, переходя от низших звеньев в трофической (пищевой) цепи к высшим, все более концентрироваться в тканях живых организмов. Водоросль кладофора за три дня извлекает из воды столько ДДТ, что его концентрация увеличивается при этом в 3000 раз! Биоаккумуляция (биоаккумуляция) веществ достаточно хорошо исследована на примере разных экосистем.

При исследовании озера Мичиган было обнаружено следующее накопление ДДТ в пищевых цепях:

- 0,014 мкг/кг (в расчете на сырой вес) в донном иле озера;
- 0,41 мкг/кг в теле ракообразных, питающихся на дне озера;
- 3–6 мкг/кг в различных видах рыб (бельдюговые, язь, елец);
- более 2000 мкг/кг в жировой ткани чаек, питающихся рыбой.

---

\* ДДТ – 1,1,1 – трихлор – 2,2 – бис (n = хлорфенил) этан.

Эффективность действия пестицидов во многом связана со способностью их молекул быстро переходить из водного раствора в жировые ткани клеточных мембран. Для любого соединения фактор бионакопления равен отношению средней концентрации соединения в тканях рыбы к концентрации соединения в воде. Фактор бионакопления  $F$  зависит от видовой принадлежности организма, незначительно зависит от времени, в течение которого оказывалось воздействие (сверх времени, необходимого для достижения системой состояния равновесия), в большей степени он определяется свойствами самих пестицидов.

Определение фактора бионакопления является важной, но дорогой процедурой, требующей длительных наблюдений в естественных условиях водоемов. Исследователи нашли возможность оценки факторов бионакопления по свойствам химических соединений, которые легко поддаются измерению в лабораторных условиях, например, по коэффициентам распределения спирт/вода. Способность проникать в жировые ткани связана со способностью лучше растворяться в неполярных (органических) растворителях, чем в воде. Следовательно в процессе моделирования можно заменить фактор бионакопления на коэффициент распределения.

Коэффициент распределения для пестицидов часто определяют как

$$K_{\text{распр}} = \frac{C_{\text{неп}}}{C_{\text{вод}}},$$

где  $C_{\text{неп}}$  – концентрация соединения в 1-октаноле (неполярный растворитель);  $C_{\text{вод}}$  – концентрация соединения в воде (полярный растворитель).

## Ход работы.

1. В табл. 3 приведены значения  $\lg K_{распр}$  (коэффициента распределения) и  $\lg F$  (фактора бионакопления) для некоторых пестицидов. Обратите внимание, что в обеих колонках приведены логарифмические величины. Постройте график зависимости  $\lg F$  (фактора бионакопления) от  $\lg K_{распр}$  (коэффициента распределения) и определите тип этой зависимости. Сделайте вывод о возможности замены фактора бионакопления коэффициентом распределения при экологической оценке воздействий пестицидов.

Таблица 3

**Значения коэффициентов распределения  
и факторов бионакопления для некоторых пестицидов  
и продуктов их распада**

Пестицид	$\lg K_{распр}$ (коэффициент распределения)	$\lg F$ (фактор бионакопления)
<i>Хлорорганические соединения</i>		
Хлордан	6,00	4,58
ДДТ	5,98	4,47
ДДЭ	5,69	4,71
ДДД	6,02	4,81
Дильдрин	5,16	4,10
Линдан	3,85	2,51
<i>Пиретроиды (соединения транс-хризантемовой кислоты)</i>		
Перметрин	5,00	3,70
<i>Продукты гидролиза перметрина</i>		
спирт	2,94	1,35
кислота	2,00	0,74
<i>Другие</i>		
Атразин	2,63	0,48
Дибензофуран	4,12	3,13

2. Пиретроиды относятся к наиболее современным типам пестицидов, они являются аналогами природного соединения (производное транс-хризантемовой кислоты), содержащегося в листьях персидской ромашки. Эфирная группа в перметрине быстро гидролизуется под воздействием факторов окружающей среды, а ДДТ разрушается до своих производных ДДЭ и ДДД, структуры которых приведены на рис. 11.

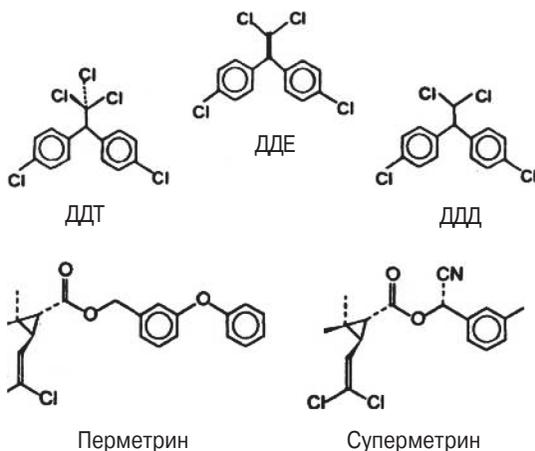


Рис. 11. Структурные формулы некоторых пестицидов

Посмотрите на величины  $\lg F$  (фактора бионакопления) этих веществ и объясните, почему ДДТ и продукты его разложения угрожают состоянию окружающей среды многие годы, тогда как перетроиды не создает подобных проблем.

*Выполнив вторую часть работы, вы сможете:*

- исследовать поведение твердых веществ при растворении в двух несмешивающихся растворителях;
- спланировать методику проведения количественных измерений.

Материалы: два небольших кристалла йода, 4 мл циклогексана, раствор йодида калия концентрации 0,2 моль/л, пинцет, штатив и пробирки с резиновыми пробками.

***Осторожно! Циклогексан относится к легко воспламеняемым соединениям.***

Вещество может быть растворимо в двух несмешивающихся растворителях, например в воде и в циклогексане. Йод умеренно растворим в воде, но хорошо растворим в водном растворе йодида калия (так как в растворе йодида калия образуется коричневый комплексный ион  $I_3^-$  в водн), поэтому раствор йодида калия используется в эксперименте вместо воды.

Растворы йода в циклогексане и водном растворе йодида калия окрашены, что позволяет делать заключения на качественном уровне о концентрации йода в каждом слое по интенсивности окраски этих слоев.

**Ход работы.**

1. Возьмите два маленьких кристалла йода приблизительно одинакового размера и поместите каждый из них в отдельную пробирку (Осторожно! Для работы с кристаллами используйте пинцет).

Добавьте 2 мл циклогексана (Осторожно! Легко воспламеняется) в одну пробирку с йодом и 2 мл водного раствора йодида калия – в другую. Закройте пробирки и встряхивайте их до полного растворения йода. Отметьте цвет каждого раствора.

2. Добавьте 2 мл водного раствора йодида калия в пробирку, содержащую йод, растворенный в циклогексане, и 2 мл циклогексана в пробирку, содержащую йод, растворенный в водном растворе йодида калия. Закройте пробирки и встряхивайте их несколько минут. Поставьте пробирки в штатив и дождитесь разделения слоев.

3. Отберите пипеткой верхний циклогексановый слой из одной пробирки и поместите его в чистую пробирку. Исследуйте, что будет происходить при добавлении второго растворителя к каждому из разделенных слоев.

4. Запишите свои наблюдения, отмечая цвет и интенсивность окраски каждого слоя. Сделайте вывод о распределении йода между двумя растворителями?

Распределение йода между двумя растворителями является равновесным процессом. Отношение концентрации растворенного вещества в растворителе А к концентрации растворенного вещества в растворителе В есть величина постоянная при данной температуре, называемая *коэффициентом распределения* (по существу, он является константой равновесия).

5. Для определения равновесных концентраций йода в водном слое и слое циклогексана вы можете использовать колориметр. Составьте план эксперимента по определению коэффициента распределения йода между водным раствором йодида калия и циклогексаном. В ходе работы вы должны убедиться, что коэффициент распределения постоянен при определенной температуре и не зависит от начальной концентрации йода в первом растворителе.

#### 4.6. Моделирование условий рассеивания выбросов промышленных предприятий

*Выполнив данную работу, вы:*

- *познакомитесь с методикой оценки дальности распространения веществ в атмосферном воздухе;*
- *научитесь использовать эту методику для моделирования распространения веществ в атмосфере в различных условиях.*

В основу «Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» ОНД-86, положено условие, при котором суммарная концентрация каждого вредного вещества не должна превышать максимальную разовую предельно допустимую концентрацию данного вещества в атмосферном воздухе ( $ПДК_{\text{мак. раз}}$ ).

Распространение в атмосфере промышленных выбросов из труб и вентиляционных устройств подчиняется законам турбулентной диффузии. На процесс рассеивания выбросов существенное влияние оказывают состояние атмосферы, расположение предприятий и источников выбросов, характер местности, химические свойства выбрасываемых веществ, высота источника, диаметр трубы и др. Горизонтальное перемещение примесей определяется в основном скоростью и направлением ветра, а вертикальное – распределением температур в атмосфере по высоте.

*Максимальная концентрация  $C_{\text{max}}$  вредных веществ (для горячей газовой смеси) у земной поверхности образуется на оси факела выброса на расстоянии  $X_{\text{max}}$  от источника выброса:*

$$C_{\text{max}} = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 T}},$$

Где  $A$  – коэффициент стратификации атмосферы, зависящий от температурного градиента и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания выбросов (для центра России принимают значение – 120);

$M$  – масса вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с;

$V_1$  – объем выбрасываемой газовой смеси, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – высота трубы, м;

$F$  – коэффициент, учитывающий скорость оседания взвешенных частиц выброса в атмосфере (для газов равен 1, для пыли при эффективности очистки газоочистной установки более 90%  $F = 2,5$  и менее 75%  $F = 3$ );

$\Delta T$  – разность между температурой выбрасываемой газовой воздушной смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха, равной средней температуре самого жаркого месяца в 13 часов;

$\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;

$m$  – безразмерный коэффициент, учитывающий условия выхода газов из трубы:

$$m = \frac{1}{0,67 + 0,1\sqrt{f} + 0,34\sqrt[3]{f}},$$

где

$$f = \frac{10^3 W_0^2 D}{H^2 \Delta T},$$

$W_0$  – средняя скорость выхода газов из трубки, м/с;

$D$  – диаметр трубы, м;

$n$  – безразмерный коэффициент, зависящий от параметра  $V_M$ , м/с:

$$V_M = 0,65 \sqrt[3]{\frac{V_1 \Delta T}{H}},$$

$n = 3$  при  $V_M \leq 0,3$ ;

$n = 1$  при  $V_M > 2$ ;

$n = 3 - \sqrt{(V_M - 0,3)(4,36 - V_M)}$  при  $0,3 < V_M < 2$ .

Максимальная концентрация загрязнителей  $C_{max}$  при выбросе холодной газовой смеси определяется по уравнению:

$$C_{max} = \frac{AMFkn\eta}{H^{4/3}},$$

где

$$k = \frac{S_1}{8V_1}.$$

Расстояние до места, где ожидается максимальная концентрация вещества-загрязнителя  $X_{max}$ , определяется для газовой мелкодисперсной пыли по формуле:

$$X = dH,$$

где

$d$  – безразмерная величина, зависящая от параметра  $V_M$ ;

$$V_M = 1,3 \frac{W_0 D}{H}$$

для холодного выброса при  $V_M \leq 2$   $d = 11,4 V_M$ ;

$$\text{при } V_M > 2 \quad d = 16,1 \sqrt{V_M};$$

для крупнодисперсной пыли  $F \geq 2$

$$X_{max} = \frac{5-F}{4} dH;$$

для горячей газовой смеси:

$$d = 4,95 V_M (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}) \quad \text{при } V_M \leq 2;$$

$$d = 7 \sqrt{V_M} (1 + 0,28 \sqrt[3]{f}) \quad \text{при } V_M > 2.$$

Концентрация загрязнителя в приземном слое атмосферы  $C_x$  на любом расстоянии  $X$  от источника выброса, отличным от  $X_{max}$ , определяется по формуле:

$$C_x = C_m S_1,$$

где

$S_1$  – коэффициент, зависящий от величины  $X/X_{max}$ .

$$S_1 = 3 \left(\frac{X}{X_{max}}\right)^4 - 8 \left(\frac{X}{X_{max}}\right)^3 + 6 \left(\frac{X}{X_{max}}\right)^2 \quad \text{при } \frac{X}{X_{max}} \leq 1;$$

$$S_1 = \frac{1,13}{0,13 \left(\frac{X}{X_{max}}\right)^2 + 1} \quad \text{при } 1 \leq \frac{X}{X_{max}} \leq 8;$$

$$S_1 = \frac{\frac{X}{X_{max}}}{3,58 \left(\frac{X}{X_{max}}\right)^2 - 35,2 \left(\frac{X}{X_{max}}\right) + 120} \quad \text{при } \frac{X}{X_{max}} > 8 (F = 1);$$

$$S_1 = \frac{1}{0,1 \left(\frac{X}{X_{max}}\right)^2 + 2,47 \left(\frac{X}{X_{max}}\right) - 17,8}$$

при  $2 \leq F \leq 3$ .

**Задание:** Рассчитайте приземную концентрацию пыли в точке, расположенной на расстоянии  $X = 1800$  м от источника загрязнения и находящейся на ветровой оси, при следующих параметрах источника:  $H = 50$  м,  $D = 0,6$  м,  $V_1 = 4,24$  м<sup>3</sup>/с; температура газов  $T = 40$  °С,  $M = 40$  г/с;  $F = 2$ .

Параметры района расположения источника:  $A = 180$ ; температура наружного воздуха  $T = 20$  °С;  $h = 1,2$ .

Расчет приземных концентраций обычно проводится с использованием специальных компьютерных программ, но для определения концентраций от одного или нескольких источников загрязнения воздуха может быть произведен вручную.

Разбейтесь на группы и произведите дополнительные расчеты, меняя следующие параметры:

- массу вещества, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, ( $M$ , г/с);
- объем выбрасываемой газовой смеси ( $V_1$ , м<sup>3</sup>/с);
- высоту трубы ( $H$ , м);
- агрегатное состояние загрязнителя ( $F$  – коэффициент, учитывающий скорость оседания взвешенных частиц выброса в атмосфере);
- температурный режим атмосферы.

Результаты групповой работы представьте на нескольких лучевых диаграммах, где по ветровым осям будут отложены концентрации вещества – загрязнителя на соответствующем расстоянии от источника.

#### **4.7. Оценка состояния окружающей среды с использованием модельных биоиндикаторов**

*Выполнив данную работу, вы:*

- *познакомитесь с методом биоиндикации и модельными растениями;*

- *освоите весовую методику определения площадей;*
- *научитесь проводить биоиндикацию состояния окружающей среды в загрязненной и чистой зонах.*

Качество окружающей среды можно оценивать непосредственно по результатам определения концентраций вредных веществ в почве, воздухе, воде с использованием физических, физико-химических и химико-аналитических методов. Второй подход заключается в оценке благополучия (видовому разнообразию, численности, состоянию, болезням и т. п.) живых организмов (микробам, растениям и животным), фактически выступающих в роли модельных систем, на которых испытаны факторы воздействия окружающей среды. Это методы биоиндикации и биотестирования. Биоиндикация лежит в основе биомониторинга реальных экосистем, а биотестирование используют в лабораторных условиях.

Биоиндикация – это обнаружение и определение биологически значимых антропогенных нагрузок на основе реакций на них живых организмов и их сообществ.

Растение-индикатор – это такое растение, у которого признаки повреждения появляются при воздействии на него определенной концентрации загрязняющего вещества или смеси таких веществ. Растение-индикатор является химическим сенсором, который может обнаружить в окружающей среде присутствие загрязняющего вещества (например, токсичные металлы, фтористый водород, сероводород, аммиак, оксид серы (IV) и др.). В результате такого воздействия у растений может измениться скорость роста и созревания, возникнуть ухудшение цветения, образования плодов и семян, измениться процесс размножения, т. е. снизиться продуктивность и урожайность.

Весовой метод (Л. В. Дорогань) заключается в определении площади листьев у древесных растений в загрязненной и чистой зонах городской среды.

Материалы: по 100 листьев с деревьев (береза, липа, тополь), растущих в разных зонах города, листы белой бумаги, ножницы, технические весы, линейка, калькулятор.

**Ход работы.**

1. Установите переводной коэффициент, который основан на сравнении веса квадрата бумаги с весом листа, имеющего такую же длину и ширину.

Для этого возьмите бумагу и очертите квадрат, равный длине и ширине листа дерева, взвесьте его, рассчитайте площадь.

Затем аккуратно обведите контуры листа дерева на такой же бумаге, вырежьте его и проведите взвешивание.

Рассчитайте переводной коэффициент, используя следующие формулы:

$$K = \frac{S_l}{S_{кв}} ,$$

где  $K$  – переводной коэффициент;

$S_l$  – площадь листа дерева;

$S_{кв}$  – площадь квадрата бумаги;

$$S_l = \frac{P_l S_{кв}}{P_{кв}} .$$

где  $P_l$  – масса контура листа;

$S_{кв}$  – площадь квадрата бумаги;

$P_{кв}$  – масса квадрата бумаги.

2. Соберите по 100 листьев, с деревьев какого-либо вида приблизительно одного возраста, что можно определить по

толщине ствола. Деревья должны произрастать вдоль крупных автомагистралей или вокруг крупного промышленного предприятия и в сравнительно чистой зоне, например в лесопарке.

3. Измерьте длину и ширину каждого листа и установите его площадь  $S$  по формуле:

$$S = ABK,$$

где  $S$  – площадь листа;  $A$  – длина листа;  $B$  – ширина листа;  $K$  – переводной коэффициент.

4. Получив ряд значений площадей листьев, разбейте их на классы по площадям, укладываемым в интервалы. Например, 10–14, 15–19, 25–29 см<sup>2</sup> и так далее. Наглядно представьте изменения признака в разных экологических условиях, для этого постройте кривые встречаемости листьев определенной площади в разных условиях, отложив на осях частоту встречаемости (в штуках) и классы площадей листовых пластинок (в см<sup>2</sup>).

Рассмотрите полученные кривые и сделайте соответствующие выводы.

5. Оформите отчет работы группы, в который включите:  
 Название растения-индикатора.

Описание зон проведения эксперимента.

Таблицу с классами площадей листовых пластинок и частотой их встречаемости (по образцу):

Классы площадей листовых пластинок, см <sup>2</sup>								
Частота встречаемости в чистой зоне, шт.								
Частота встречаемости в грязной зоне, шт.								

Кривые распределения площадей листовых пластинок.  
Вывод по работе.

#### 4.8. Конструирование модели грунтовых вод

*Выполнив данную работу, вы научитесь:*

- *проектировать и строить модель, демонстрирующую свойства грунтовых вод;*
- *использовать эту модель для демонстрации следующих понятий: инфильтрация, капиллярная вода, гравитационная вода, просачивание, грунтовые воды, загрязнение грунтовых вод, уровень грунтовых вод, колодец, истощение запасов грунтовых вод, выщелачивание, пополнение грунтовых вод, и взаимосвязи перечисленных явлений.*

Материалы: водонепроницаемый резервуар, прозрачная пластмассовая труба, почва, песок, вода, пищевой краситель.

**Ход работы.**

1. Возьмите или изготовьте водонепроницаемый резервуар с прозрачной стеклянной или пластмассовой стенкой.

2. Поместите туда почву и вставьте прозрачную пластмассовую трубку, имитирующую колодец. На дно трубки поместите немного крупнозернистого песка или мелких камешков.

3. Изучите теоретический материал, чтобы иметь ясное представление о перечисленных выше явлениях и проверить пригодность Вашей модели для их демонстрации.

4. Спланируйте эксперимент, обсудите план в группе.

5. Сфотографируйте все фазы эксперимента и подготовьте презентацию.

## 4.9. Рост населения и суммарный коэффициент рождаемости

Материалы: узкие бумажные полосы, миллиметровка

Ход работы.

1. Разделитесь на две группы. Одна группа будет моделировать изменение численности популяции А, для которой суммарный коэффициент рождаемости составляет 4, а другая будет изучать динамику популяции Б с суммарным коэффициентом рождаемости 2. Предположим, что в каждой популяции продолжительность жизни составляет 60 лет, а воспроизведение происходит в возрастной группе 20–29 лет.

2. Возьмите одинаковое число бумажных полос, соответствующее первоначальной численности популяций (в тысячах человек). Отметьте на вертикальной шкале временные десятилетние интервалы. Передвигайте все полоски бумажной ленты на одно деление (интервал 10 лет) вверх, добавляя снизу новую полоску, обозначающую новорожденных. Число новорожденных равняется половине количества людей репродуктивного возрастом 20–29 лет (это число женщин способных к деторождению), умноженной на коэффициент рождаемости. Убирайте полоски бумаги, когда они пересекают отметку средней продолжительности жизни, (люди старше 60 лет умирают).

3. Для каждого десятилетнего интервала занесите соответствующие данные в таблицу. Сделайте записи для девяти интервалов (периода 90 лет).

4. Отрадите результаты моделирования на графике. При построении графика откладываете по оси абсцисс годы, а по оси ординат – численность людей. Обе кривые (результаты работы двух групп) представьте на одном графике.

5. Проведите анализ результатов:

А. Сравните рост численности двух популяций и ответьте на следующие вопросы:

- Прекратится ли когда-нибудь рост популяции А? Через какое время ее численность удвоится?
- Возможно ли удвоение численности популяции Б?
- Как влияет суммарный коэффициент рождаемости на рост населения?

Б. Сравните половозрастные пирамиды двух популяций и ответьте на следующие вопросы:

- Какова форма пирамиды и кривой роста популяции А?
- Какова форма пирамиды и кривой роста популяции Б?

В. Сравните эти половозрастные пирамиды с ситуацией в развитых и развивающихся странах.

6. Повторите работу, добавив полоски еще для трех возрастных групп в каждой популяции, чтобы показать увеличение продолжительности жизни до 90 лет. Заполните таблицу и представьте графически данные о взаимосвязи роста численности населения и продолжительности жизни.

Ответьте на следующие вопросы.

- Как влияет на рост двух популяций увеличение пост-репродуктивной продолжительности жизни? Будет ли популяция А расти намного быстрее? Будет ли непрерывно расти популяция Б?
- Увеличение рождаемости или продолжительности жизни главным образом определяет рост населения? Какие еще факторы влияют на демографию?
- Влияет ли увеличение продолжительности жизни на проблему перенаселения?

7. Более сложный вариант работы. Повторите работу для одной популяции с 5000, 4000 и 3000 человек в первых трех возрастных группах. Постройте таблицу для восьми интервалов (80 лет) с учетом того, что суммарный коэффициент рождаемости равен 4 в первые 30 лет и затем па-

дает до 2. Постройте кривую роста населения для периода 80 лет. Определите демографический потенциал.

Ответьте на следующие вопросы.

- Почему не прекращается ли рост населения при снижении суммарного коэффициента рождаемости до 2?
- Что такое демографический потенциал? Соотнесите это понятие с ростом населения в развивающихся странах.

8. Найдите данные о демографической ситуации в разных регионах России и разных странах.

## Приложение

*Из книги «Математическое моделирование в экологии:  
Историко-методологический анализ»  
(В. Н. Тютубалин, Ю. М. Барабашева, А. А. Григорян,  
Г. Н. Девяткова, Е. Г. Угер)*

### Колодки статистической обработки измерений

Пусть (сказали Лаплас и Гаусс) в  $n$  опытах измеряются  $n$  величин, истинные значения которых  $a_1, a_2, \dots, a_n$ . Поскольку ни одно измерение не обходится без ошибок, мы получили результаты измерений  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , где  $x_i = a_i + \delta_i$ , причем  $\delta_i$  – это ошибка  $i$ -го измерения. Поскольку ошибка измерения определяется каким-то сочетанием случайных факторов (случайных в смысле древнего архетипического представления о случайности) будем смотреть на ошибки  $\delta_i$  как на значения случайных величин. Итак, модель результатов измерения имеет вид

$$x_i = a_i + \delta_i, \quad (\text{П. 1})$$

где  $\delta_i$  – случайные величины.

Пока что сказано нечто тривиальное, а первая нетривиальная мысль состоит в том, что во многих случаях точные значения  $a_1, a_2, \dots, a_n$  могут быть связаны уравнениями, вытекающими из известных законов природы (мы воспроизводим рассуждения рубежа XVIII и XIX вв., когда науки уже развиты и законов природы известно немало). Если в эти уравнения подставить вместо  $a_1, a_2, \dots, a_n$  результаты их измерений  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , содержащие ошибки, то, разумеется, уравнения не будут соблюдаться точно. Нельзя ли как-то использовать получающиеся «невязки» с законами природы для уточнения результатов измерений и вообще для

извлечения какой-то полезной информации? Оказывается — можно, и для этого предназначен метод наименьших квадратов Гаусса. Для наших целей этот метод в его общем виде не нужен: мы ограничимся простейшим частным случаем, когда из законов природы вытекает уравнение

$$a_1 = a_2 = a_n = a,$$

т. е. во всех опытах определяется одна и та же величина  $a$ . Модель (П. 1) принимает вид

$$x_i = a + \delta_i. \quad (\text{П. 2})$$

Если в моделях (П. 1) и (П. 2) под  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  понимать просто какие-нибудь случайные величины, то эти модели тривиальным образом верны, но не ведут ни к какой обработке наблюдений. Обработка становится возможной, если что-то предположить дополнительно о величинах  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ . Важнейшим из таких предположений является предположение об одинаковом распределении случайных величин  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ . Это означает, например, что вероятности  $P\{\delta_i < z\}$ , где  $z$  — любое вещественное число, одинаковы для всех  $i = 1, \dots, n$ . (Данное предположение может быть несколько ослаблено, но незначительно.)

На языке здравого смысла это предположение означает следующее. Случайная величина — это результат некоторого случайного эксперимента. Например, можно представить себе, что некий демон держит в руках мешок, в котором находится очень большое число бумажных билетиков, на которых написаны числа. Мы не вдаемся в детальный процесс образования ошибок измерений, а моделируем его следующим образом. При каждом измерении демон наудачу достает билетик из мешка, а написанное на нем число и есть ошибка данного измерения. Потом билетик кладется обрат-

но, а при следующем измерении все повторяется. В таком случае предположение об одинаковом распределении всех ошибок измерений сводится к тому, что демон не имеет права менять мешок: мешок не зависит от номера измерения. Понятно, что это очень сильное предположение о стабильности (во времени) источника ошибок эксперимента.

Это основное предположение статистической однородности ошибок измерений в классической теории дополняется еще двумя. Во-первых, предполагается, что отсутствует систематическая ошибка, т. е.  $E \delta_i = 0$ , где знак  $E$  обозначает математическое ожидание. Классики аргументировали в пользу этого предположения примерно следующим образом: раз ученый, делающий измерения, является честным человеком, то он не будет систематически завышать или занижать результаты своих измерений, а в таком случае для него одинаково вероятно ошибиться на  $(+\varepsilon)$  и на  $(-\varepsilon)$ , что приводит к тому, что  $E \delta_i = 0$ . Конечно, подобная аргументация нам представляется наивной, поскольку ошибки измерений зависят не только от субъективной честности измерителя, но и от свойств приборов, которыми он пользуется. Однако если мы уже приняли гипотезу об одинаковом распределении ошибок, то в таком случае их математические ожидания тоже одинаковы:  $E \delta_i = \alpha$ , т. е. фактически вместо величины  $a$  в (П. 2) мы измеряем  $a + \alpha$ . Такая ситуация должна, вообще говоря, скоро обнаружиться. Например, если наши измерения геодезические, то как только мы измерим углы какого-то (пусть, для простоты, плоского) треугольника, то сразу и найдем, что их сумма отличается от теоретических  $180^\circ$ . Другое дело, если систематическая ошибка  $\alpha$  не остается все время постоянной, а может зависеть скажем, от истинного значения  $a$  измеряемой величины (в разных участках шкалы прибора разные систематические

ошибки). Такие систематические ошибки вылавливать сложнее (и наиболее правильно считать, что классическое предположение  $E\delta_i = 0$  является просто исходным пунктом, отправляясь от которого, начинается ловля систематических ошибок).

Вторым предположением является предположение о статистической независимости ошибок различных измерений. В эпоху Лапласа и Гаусса (около двухсот лет назад) различные случайные величины обычно считались независимыми. Вероятностные модели с зависимыми случайными величинами начинают появляться примерно на век позже. Однако и в настоящее время мы с крайней неохотой будем пользоваться моделями с зависимыми ошибками, если наша задача — обработать какие-то конкретные наблюдения. Другое дело, что такие модели могут употребляться для критики классических концепций (см. об этом книгу П. Е. Элиасберга<sup>18</sup>, о которой несколько слов будет сказано ниже).

Наконец, можно вводить или не вводить предположение, состоящее в том, что отдельные ошибки измерений  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$  имеют нормальное распределение. Если это предположение ввести (классики склоняются к нему), то для дальнейшего не требуется центральная предельная теорема. Если этого предположения не вводить, то нормальность распределения среднего значения  $\bar{x} = (1/n)\sum x_i$  следует обосновывать ссылкой на центральную предельную теорему.

Какие же блага вытекают из всех этих предположений? Действительно доставляется некая важная опора для знаний, основанных на наблюдениях. В самом деле, каждая домашняя хозяйка знает, что за оценку истинных значений  $a$  нужно взять  $\bar{x}$ , но насколько это  $\bar{x}$  может отличаться от истинного  $a$ ? Ответ:  $Ex = a$ , дисперсия  $Dx = \sigma^2/n$ , где  $\sigma^2 = D\delta_i$  — диспер-

сия отдельного наблюдения. Следовательно, используя таблицы нормального закона, находим, например, что

$$P\{|\bar{x} - a| \leq 1,96\sigma/\sqrt{n}\} = 0,95. \quad (\text{П. 3})$$

Беря грубо вместо 1,96 число 2, получаем, что лишь в одном случае из 20 отклонение  $\bar{x} - a$  может превосходить по (абсолютной величине) число  $2\sigma/\sqrt{n}$ . Вопрос состоит лишь в том, как найти  $\sigma$ . Если бы ошибки  $\delta_i = x_i - a$  были наблюдаемы, мы взяли бы за приближенное значение  $\sigma^2 = D\delta_i = E\delta_i^2$ , среднее значение  $(1/n)\sum\delta_i^2$ . Но раз мы самих ошибок  $\delta_i$  не знаем, возьмем кажущиеся ошибки  $x_i - \bar{x}$  и составим выражение

$$S^2 = (1/n)\sum(x_i - \bar{x})^2. \quad (\text{П. 4})$$

Классики рекомендовали принять приближенно  $\sigma^2 \approx S^2$ , иными словами, заменить в (П. 3) неизвестное  $\sigma$  на легко вычисляемое по формуле (П. 4) значение  $S$ . Последовавший затем длительный математический анализ вполне подтверждал рекомендацию классиков (в рамках их модели) при числе наблюдений  $n$  порядка одного-двух десятков и более. Небольшая разница состоит в том, что теперь вместо (П. 4) обычно берут чуть отличающееся выражение:

$$s^2 = (1/(n-1))\sum(x_i - \bar{x})^2,$$

но при  $n$  порядка десятков (и более) разница между  $S$  и  $s$  несущественна.

Изложенная рекомендация в наше время широко известна (хотя все-таки не каждой домашней хозяйке), но двести лет назад речь шла о настоящем чуде. В самом деле, пределы для возможной ошибки среднего из  $n$  наблюдений (по отношению к абсолютно истинному значению  $a$ ) устанавливаются без каких-либо сведений о том, что именно измеряется

и каким методом, а лишь исходя из «невязок» наблюдений, т. е. разностей  $x_i - \bar{x}$ . Посмотрим, какой пример этого чуда дается в магистерской диссертации Чебышева.

На последней странице диссертации приводятся  $n = 29$  наблюдений Кэвендиша по определению постоянной всемирного тяготения. Значение этой постоянной Кэвендиш пересчитывал в значение средней плотности Земли. Таким образом, приводятся значения плотности Земли (в г/см<sup>3</sup>), которые колеблются от 5,07 до 5,88. Истинное значение, разумеется, лежит где-то в середине, и отклонения от него достигают примерно 0,40, т. е. около 10% измеряемой величины. Спрашивается, каков порядок точности среднего значения  $\bar{x}$ ?

Всего лишь нужно вычислить  $\bar{x}$  и  $S^2$  по формуле (П. 4). Чебышев это и делает, но он сделал уже массу формульных и численных вычислений в своей диссертации. (В частности, комментатор к изданию критикует лишь последний – седьмой – знак таблицы нормального закона, составленной Чебышевым.) К концу работы он, видимо, устал и простые вычисления производит с потрясающей арифметической безграмотностью. Имеет место алгебраическое тождество:

$$S^2 = (1/n) \sum (x_i - \bar{x})^2 = (1/n) \sum x_i^2 - (\bar{x})^2,$$

и Чебышев производит вычисления по его правой части. В этом случае (как понятно каждому гимназисту) нужно от всех чисел  $x_i$  отбросить целую часть, равную 5, и вычислять с дробями. Но Чебышев этого не делает. Он принимает округленно  $\bar{x} = 5,48$ . Оба числа  $(1/n) \sum x_i^2$  и  $(\bar{x})^2$  оказываются близкими к 30, а первая отличная от нуля цифра их разности – знак сотых. Если учесть, что более точно  $\bar{x} = 5,482$ , то получается, что ошибка 0,002 в значении  $\bar{x}$  влияет на знак сотых в значении  $(\bar{x})^2$ , и тем самым на первую значащую

цифру в значении  $S^2$ . К счастью, при вычислении  $\sum x_i^2$  Чебышев тоже каким-то образом ошибся, обе ошибки компенсировались и получился достаточно точный результат. Он эквивалентен тому, что  $S/\sqrt{vn} \approx 0,04$ . Итак, ожидаемый порядок ошибки значения  $\bar{x}$  составляет что-то около 1% измеряемой величины (Чебышев заключает, что истинное значение плотности с близкой к 1 вероятностью лежит в пределах  $5,48 \pm 0,1$ ). Теперь, через полтора века после Чебышева, мы можем сказать, что чудо, в самом деле, произошло: в настоящее время принято значение плотности Земли 5,52, и разница  $5,52 - 5,48$  составляет как раз 0,04. Видимо, объективный мировой Разум так бережет выдающихся ученых ранга Кэвендиша и Чебышева, что дает им возможность совершить научное чудо на удивление потомкам, несмотря даже на арифметические ошибки.

По совокупности изложенных фактов можно сделать следующие выводы, которые на самом деле касаются не только теории ошибок, но и других приложений вероятностных методов.

Конечно, Лаплас и Гаусс задумывали теорию ошибок как некую физическую теорию для оценки влияния ошибок наблюдений на конечный результат обработки – физическую в том смысле, что ее выводы должны подтверждаться на уровне физической парадигмы. Например, доверительные интервалы для значений физических величин должны, как правило, подтверждаться по мере развития методов измерения. Однако подобные подтверждения столь редки, что скорее должны рассматриваться как чудо. (Чудо бывает, когда добиваются желаемого результата явно недостаточными средствами.) Спорить с тем, что в очень многих случаях вероятностная модель теории ошибок не адекватна (на физическом уровне строгости) реальным ошибкам, нет никакой возможности.

Правда, одним из бесспорных чудес, связанных с этой моделью, является то, что при дальнейшем развитии науки она оказалась адекватной (на том самом физическом уровне) моделью для других явлений. Стоит заменить слова « $\delta_i$  – ошибка  $i$ -го наблюдения» на слова « $\delta_i$  – проекция на ось абсцисс скорости  $i$ -й молекулы», как мы получим модель газа Максвелла. При этом верно, что  $E \delta_i = 0$ , что  $D \delta_i$  одинаковы и что  $\delta_i$  – статистически независимы и распределены по нормальному закону. Мы принимаем такую модель газа в качестве простой, но в физическом смысле полноправной модели. Как видно, мировой Разум позаботился также о Лапласе и Гауссе, чтобы их способ думать на что-нибудь пригодился. Но что касается обработки результатов измерений, то тут, кажется, есть всего три возможности:

1) не заниматься обработкой совсем (кроме элементарного представления результатов в удобочитаемом, в частности, графическом, виде);

2) разрабатывать новые, более сложные модели, надеясь на их адекватность;

3) обрабатывать результаты с помощью метода наименьших квадратов и его более современных аналогов, смягчив, однако, ту философию, которая определяет, какой радости мы ожидаем от этой обработки.

Первый выход – скверный, так как в этом случае отдельные наблюдения детально вообще не анализируются и мы рискуем упустить что-то важное (что на самом деле имеется в фактическом материале, но мы не обращаем на него внимания).

Второй выход – мало реальный, так как усложнение моделей (например, введение корреляций между ошибками наблюдений) обычно не делает их более адекватными.

Мы склоняемся к третьему выходу, который имеет хотя бы то преимущество, что естественно вырос из классики и

потому обеспечен компьютерными программами обработки. Конечно, держать пари с последующими поколениями ученых относительно точности определения физических величин вряд ли стоит. Но сопоставление реальных данных с какой-то колодкой мышления (пусть даже ее неадекватность заведомо допускается) обычно позволяет заметить какие-то новые особенности данных, которые не были бы замечены без обработки. Философия сводится, таким образом, к надежде более полно проявить какую-то дополнительную часть информации, содержащейся в данных, причем недорогой ценой – используя существующие программы обработки.

---

Использовались авторские разработки И. Б. Небела, А. И. Федоровой, А. Н. Никольской, Л. М. Игольницинной, М. А. Черепановой, Г. А. Ягодина.

Представленные в пособии практические работы могут быть осуществлены:

- как порознь, так и в комплекте;
- как под руководством преподавателя, так и самостоятельно;
- индивидуально или в группе;
- как на этапе профессионального обучения, так и для последующего профессионального самообразования.

Проведение практических работ по экологическому моделированию и обработка результатов не требуют сложного материально-технического обеспечения и могут осуществляться в обычных учебных аудиториях или компьютерных классах.

Автор надеется, что реализация принципа интеграции научной, прикладной и социокультурной составляющих

при работе с данным учебно-методическим пособием позволит интенсифицировать процесс обучения, активизировать самостоятельную работу студентов, являющуюся основой дальнейшего успешного самообразования. Осознание значимости решения экологических проблем, формирование эмоционально-ценностного отношения к изучаемому материалу позволит мотивировать студентов к экологически значимой практической деятельности, что соответствует инновационным процессам в области экологического образования.

## Литература

- <sup>1</sup> *Якиманская И. С.* Личностно-ориентированное обучение в современной школе. – М., 1996.
- <sup>2</sup> *Налимов В. В.* Вероятностная модель языка. – М., 1979.
- <sup>3</sup> *Мак-Карти В.* Четыре системы стилей преподавания: техника правого-левого режимов. – М., 1980.
- <sup>4</sup> *Лагоша Б. А.* Методы имитационного моделирования: Учебное пособие Моск. экон.-стат. ин-та. – М., 1986; *Мизинцев В. П.* Применение моделей и методов моделирования в дидактике: Материалы лекций. – М.: Знание, 1977; *Кларин М. В.* Инновации в обучении; метафоры и модели: Анализ зарубежного опыта. – М.: Наука, 1997.
- <sup>5</sup> *Степановских С. А.* Прикладная экология. – М. – С. 603.
- <sup>6</sup> *Общая экология: Учебное пособие для студентов педагогических вузов / И. Н. Пономарева, В. П. Соломин, О. А. Корнилова. Под ред. И. Н. Пономаревой.* – М., 2005. – С. 55.
- <sup>7</sup> *Мартыщенко Л. А.* Введение в статистическое моделирование технических систем. – М., 1982.
- <sup>8</sup> *Хакимов Э. М.* Логико-методологический анализ понятия «моделирование». – Казань, 1985. – С. 5–6.
- <sup>9</sup> *Советский энциклопедический словарь.* – М., 1986. – С. 1077.
- <sup>10</sup> Rankin N. Methods of designing frameworks / The IRS handbook on Competencies. 2001.
- <sup>11</sup> *Федоров В. Д., Ильманов Т. Г.* Экология. – М.: Изд-во МГУ, 1980.
- <sup>12</sup> *Экология: Учебник для технических вузов / Под ред. Л. И. Цветковой.* – М., 1999. – С. 208.
- <sup>13</sup> *Природа моделей и модели природы / Под ред. Д. М. Гвишиани, И. Б. Новика, С. А. Пегова.* – М.: Мысль, 1986. – С. 41.
- <sup>14</sup> *Ивченко Б. П., Мартыщенко Л. А.* Информационная экология. Ч. 1. Оценка риска техногенных аварий и катастроф. Статистическая интерпретация экологического мониторинга. Моделирование и прогнозирование экологических ситуаций. – СПб.: «Нордмед-Издат», 1998.
- <sup>15</sup> *Природа моделей и модели природы / Под ред. Д. М. Гвишиани, И. Б. Новика, С. А. Пегова.* – М.: Мысль, 1986. – С. 14.
- <sup>16</sup> *Вольтерра В.* Математическая теория борьбы за существование. – М.: Наука, 1976.

<sup>17</sup> Гаузе Г. Ф., Витт А. А. О периодических колебаниях численности популяций: математическая теория релаксационного взаимодействия между хищниками и жертвами и ее применение к популяциям двух простейших // Изв. АН СССР. Отд. матем. и естеств. наук. – 1934. Т. 10. С. 1551–1559.

<sup>18</sup> Эльясберг П. Е. Измерительная информация: сколько ее нужно? как ее обрабатывать? – М.: Наука, 1983.

## Оглавление

От автора .....	3
Глава 1. Методологические и теоретические основы процесса моделирования .....	11
Глава 2. Моделирование как метод экологических исследований .....	23
Глава 3. Количественная оценка многофакторных воздействий в экологическом моделировании .....	38
Глава 4. Практические работы «Моделируем и изучаем экосистемы» .....	48
4.1. Создание и поддержание искусственной экосистемы аквариума .....	48
4.2. Построение блок-схемы экосистемы .....	49
4.3. Изготовление модели – мобиля18 .....	55
4.4. Дидактическая игра «Круговорот углерода» .....	59
4.5. Выбор модельных характеристик .....	70
4.6. Моделирование условий рассеивания выбросов промышленных предприятий .....	76
4.7. Оценка состояния окружающей среды с использованием модельных биоиндикаторов .....	81
4.8. Конструирование модели грунтовых вод .....	85
4.9. Рост населения и суммарный коэффициент рождаемости .....	86
Приложение .....	89
Литература .....	99

*Учебное издание*

**Роговая Ольга Геннадьевна**

**ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ:  
ПРАКТИКА**

**Учебно-методическое пособие**

Выпускающий редактор А. С. Балужева

Корректор С. П. Левкович

Дизайн, компьютерная верстка И. Г. Гурова

ООО «Книжный Дом», лицензия № 05377 от 16.07.2001.  
191186 Санкт-Петербург, ул. М. Конюшенная, 5.

Подписано в печать 29.11.2007. Формат 60 x 84/<sub>16</sub>.

Гарнитура «Школьная». Объем 6,5 печ. л.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Тираж 350 экз. Заказ № 144.

Отпечатано в типографии ООО «Престо»,  
Санкт-Петербург, ул. Казанская, 5



