

*Е. А. Малиновская, канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель кафедры Компьютерной безопасности
Ставропольского государственного университета*

*Р. А. Рыскаленко, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Математического анализа
Ставропольского государственного университета*

Разработка экспертной системы для решения проблем природопользования¹

В статье приведены примеры и методики применения экспертных систем для анализа и сопоставления результатов вычислительного эксперимента по данным экологического мониторинга территориально протяженных природных систем.

Введение

Обширный материал, содержащий различные сведения эмпирического (статистического) и аналитического характера накоплен по вопросам исследования природных процессов. Анализируя проводимые исследования в сфере природопользования, можно выделить 3 направления:

- разработка методов математической экологии, построение моделей, программных комплексов в целях обоснования воздействия техногенных факторов на природные процессы в рамках развития техногенной и природной систем;
- количественная и качественная оценка возможных результатов антропогенного воздействия на отдельные элементы природных систем;
- планирование развития техногенной и природной систем, разработка безопасной, эффективной модели социально-экономического развития, наиболее отвечающей экологическим принципам.

На современном этапе экологического мониторинга остро стоит проблема обра-

ботки и систематизации имеющихся данных, что связано с необходимостью совершенствования прогнозов в условиях усиливающегося воздействия антропогенных факторов на окружающую среду. Чтобы выработать эффективную концепцию управления, следует определить подход и инструментальный исследования природных систем, разработать технологии и методы решения прикладных задач. Неоценимое значение имеют реализация методов успешного управления природопользованием и обеспечение экологической безопасности. Эффективным инструментом становятся информационно-вычислительные системы поддержки принятия решений, ориентированные на оценку рисков развития катастроф в экологических системах. При этом возможно систематизировать, хранить в базе знаний и анализировать получаемые данные с использованием математических моделей (как аналитических, так и стохастических). Главной целью являются анализ динамических процессов территориального природного комплекса, разделенного на области [5], и определение механизма, позволяющего встроить результаты вычислительных экспериментов, применимых для локальных областей малого масштаба, в общую территориальную систему.

Рассмотрим некоторые частные задачи исследования из области природопользова-

¹ Статья освещает результаты исследований по гранту МК-1070.2010.5 программы Президента РФ поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук.

ния и проиллюстрируем примерами принципы разработки экспертных систем.

Задача 1

В качестве первой частной проблемы природопользования возьмем задачу формирования лёссовых отложений в результате переноса пыли. Исследование этой проблемы связано с описанием климата прошлого, что может быть использовано для обоснования или опровержения принятой на современном этапе гипотезы изменения климата под влиянием антропогенного воздействия [1]. Лёссовые породы являются одним из наиболее распространенных типов континентальных отложений нашей планеты. На территории Российской Федерации они занимают около 15% площади, в равнинной степной части Северного Кавказа — 80%. В работе [6] построен комплекс моделей, описывающих выдувание частиц поверхности, структурирование песчаной среды и формирование геологических слоев при ветровом воздействии, а также распространение частиц в атмосфере.

Принцип формирования взаимосвязанных данных в базе знаний

На основе результатов [6] выделяем следующий набор характеристик для формирования базы знаний: скорость ветра $\bar{u}$, тип и характеристики лёссовых отложений (средний радиус частиц r , закон распределения частиц по размерам $F(r)$), толщина слоев лёссовых отложений (l), особенности рельефа (угол наклона плоскости поверхности к горизонту α). Представим их множеством:

$$V = \{u_i, \{r_j, F(r_j)\}, l_k, \alpha_p\}, \quad (1)$$

где $i, j, k, p = 1, 2, 3, \dots$

Результаты вычислительных экспериментов записываем в объекты класса (см. листинг 1), данные о которых сохраняем в файл.

Класс удобно использовать для описания базы знаний, так как это позволяет в одном объекте задать не только множество (1), но и взаимосвязи между его элементами и подмножествами.

Листинг 1.

Фрагмент кода программы, описывающий параметры, связанные с результатами вычислительных экспериментов

```
class Vhod_zn_lessy {
    protected:
        double * u;
        double * r;
        double * l;
        double * alfa;
        bool * x;
    public:
        void F(double *r);
        void vhdod_zn();};
...
```

Принцип определения значений для территории

Построим сетку размерностью $X \times Y$. Для каждого элемента V_{xy} , очерченного сеткой, запишем множество по аналогии с (1):

$$V_{xy} = \{u_{xy}, \{r_{xy}, F(r_{xy})\}, l_{xy}, \alpha_{xy}\},$$

где $x, y = 1, 2, 3, \dots$ (2)

В программе строим класс (см. листинг 2) для значений, определяемых, исходя из данных наблюдений (мониторинга) для территории.

Листинг 2.

Фрагмент кода программы, описывающий параметры, связанные с данными мониторинга для некоторой исследуемой территории

```
class Ter_zn_lessy {
    protected:
        double ** uu;
        double ** rr;
        double ** ll;
        double ** alfa;
    public:
        void F(double **rr);
        void vhdod_zn();};
```

Принцип анализа протяженных территорий с использованием нейронных сетей

Для анализа и систематизации данных, полученных при исследовании некоторой протяженной территории, используем нейронную сеть Кохонена, позволяющую классифицировать образы [7]. Для определения входных сигналов выбираем множество (2):

$$\begin{aligned} u_{xy} &= \{x_i\}, \text{ где } i = \overline{1, i_u}; \\ r_{xy} &= \{x_i\}, \text{ где } ri = \overline{1, i_r}; \\ l_{xy} &= \{x_i\}, \text{ где } i = \overline{1, i_l}; \\ \alpha_{xy} &= \{x_i\}, \text{ где } i = \overline{1, i_\alpha}. \end{aligned} \quad (3)$$

Чтобы задать для нейронов сети пороговые функции, воспользуемся принципом получения данных множества (1). При этом учитываем, что задача экспертной системы — сопоставить входные данные с результатами вычислительных экспериментов, на основе которых построена база знаний по логическим схемам, изображенным на рис. 1–3.

В схеме, представленной на рис. 1, предполагается, что в вычислительном эксперименте заданы значения для скорости ветра, угла наклона поверхности и характерный закон распределения частиц по размерам, осуществлен расчет значения l — толщины слоя. Если задать точность определения величины l , то можно записать аналогичные соотношения для элементов множества u и α (рис. 2, 3).

Остальные варианты логических выражений не имеют смысла с физической точки зрения.

При теоретическом изучении геологического прошлого территории, используя логические схемы и данные из множеств (1) и (2), можно ответить на следующие вопросы о:

- повторяемости пыльных бурь, определяемой толщиной слоев (задача №3 в табл. 1), так как скопление более крупных частиц (одного размера) на фоне других участков залегания частиц разного размера визуально определяет деление на слои, а при больших скоростях ветра частицы всех размеров участвуют в атмосферном перемешивании;

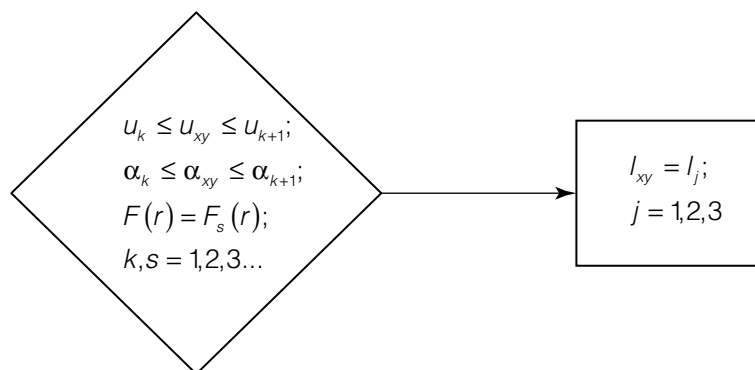


Рис. 1. Схема описания взаимосвязей между входными параметрами (скорость ветра, угол наклона поверхности, распределение частиц по размерам) и выходным параметром (толщина слоев):

$u_k \leq u_{xy} \leq u_{k+1}$ — условие для скоростей ветра;
 $\alpha_k \leq \alpha_{xy} \leq \alpha_{k+1}$ — условие для наклона поверхности;
 $F(r) = F_s(r)$ — условие для функции распределения по размерам;
 $k, s = 1, 2, 3...$
 $l_{xy} = l_j, j = 1, 2, 3...$ — соответствие условию

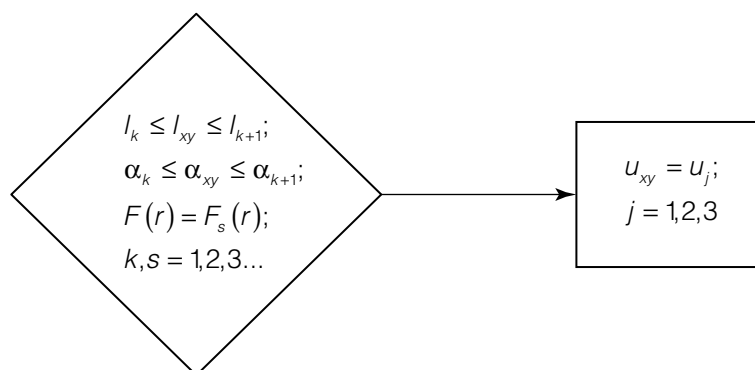


Рис. 2. Схема описания взаимосвязей между входными параметрами (толщина слоев, угол наклона поверхности, распределение частиц по размерам) и выходным параметром (скорость ветра):

$l_k \leq l_{xy} \leq l_{k+1}$ — условие для толщины слоя;
 $\alpha_k \leq \alpha_{xy} \leq \alpha_{k+1}$ — условие для наклона поверхности;
 $F(r) = F_s(r)$ — условие для функции распределения по размерам;
 $k, s = 1, 2, 3...$ — соответствие условию
 $u_{xy} = u_j, j = 1, 2, 3...$

• возможных причинах аномального скопления лёссовых отложений на территории (задача № 2 в табл. 1, рис. 3): либо это следы осадочных отложений, либо поверхность была сформирована под действием ветра (массоперенос);

• имитационном моделировании (прогнозе) формирования слоев при заданных параметрах (задача № 1 в табл. 1, рис. 2).

Следующим этапом является постановка конкретной исследовательской задачи для территории. Предположим, необходи-

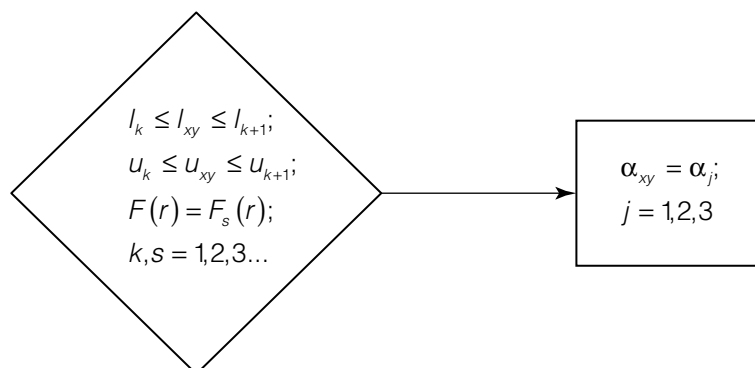


Рис. 3. Схема описания взаимосвязей между входными параметрами (скорость ветра, толщина слоев, распределение частиц по размерам) и выходным параметром (угол наклона поверхности):

$l_k \leq l_{xy} \leq l_{k+1}$ — условие для толщины слоя;
 $u_k \leq u_{xy} \leq u_{k+1}$ — условие для скоростей ветра;
 $F(r) = F_s(r)$ — условие для функции распределения по размерам;
 $k, s = 1, 2, 3...$ — соответствие условию
 $\alpha_{xy} = \alpha_j, j = 1, 2, 3...$

Таблица 1

Входные-выходные данные для задач исследования лёссовых отложений в геологии

№	Входные данные		Соответствие
1	Скорость ветра	угол наклона	распределение частиц по размерам
2	Скорость ветра	толщина слоя	
3	Угол наклона	толщина слоя	
			Толщина слоя
			Угол наклона
			Скорость ветра

мо решить задачу № 1 из табл. 1. Так как для исследуемой территории нам известны характерные скорости и направление ветра, особенности рельефа и распределение частиц по размерам, зададим весовые коэффициенты, связывающие входы с нейронами, в соответствии с теоретическими соображениями. Известно, что:

1) при увеличении скорости ветра уменьшается толщина лёссовых слоев;

2) угол наклона поверхности, если она с наветренной стороны, увеличивает толщину слоя и зависит от высоты расположения на холме.

Зададим весовые коэффициенты, описываемые методом класса `r_type()` ($F(r) = F_s(r)$), для l таким образом, чтобы при его равенстве 1 распределение частиц по размерам соответствовало наименьшей толщине слоя.

Веса, связывающие нейроны сети с входными сигналами для значений l , задаем малыми случайными значениями и настраиваем при реализации алгоритма обучения сети (табл. 2).

Реализация экспертной системы в программе

При подборе весовых коэффициентов w_{ij} нейронной сети для l в задаче обучим нейронную сеть в соответствии со следующим алгоритмом.

Шаг 1. Инициализация сети. Загрузка из файла весовых коэффициентов обученной сети w_{ij} , где $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, m$.

Шаг 2. Представление сети входного сигнала $vhod_{xy}$, определяемого значениями для ячейки на сетке: X , Y .

Шаг 3. Вычисление расстояния от входа до всех нейронов сети:

$$d_j = \sum_{i=1}^n (vhod_{xy} - w_{ij}^N)^2, \quad j = 1, 2, \dots, m.$$

Шаг 4. Выбор нейрона с наименьшим расстоянием d_j .

Шаг 5. Настройка весов, которые определяют связи нейронов сети с входными сигналами для значений l :

$$w_{ij}^{N+1} = w_{ij}^N + \eta_N (vhod_{xy} - w_{ij}^N).$$

Шаг 6. До тех пор, пока не будет достигнуто требуемое соответствие, повторяются шаги 2–5.

Шаг 7. Сохранение результатов в файл, их визуализация (рис. 4).

Выводы по задаче 1

Таким образом, для решения задачи анализа лёссовых отложений из области геологии можно использовать экспертную систему с элементами применения искусственных нейронных сетей. Для протяженных территорий экспертные системы — наиболее оптимальное средство теоретического информационно-аналитического исследования, так как реализация вычислительного эксперимента для территорий в тысячи метров является либо неточной, либо требующей существенных ресурсов и материальных средств, либо невозможной, поскольку необходимо объединить физику процессов с большим потоком данных мониторинга.

Задача 2

Вторая большая и ресурсоемкая задача связана с физико-химической пробле-

Таблица 2

Принцип работы нейронной сети

Входные значения	Сравнение с данными из базы знаний	Входной сигнал	Веса нейронов	Выходные сигналы
u [x] [y]	u1...u2	0	0,5	0
	u2...u3	0	0,4	
	u3...u4	0	0,3	0
	u4...u5	1	0,2	
	u5...u6	0	0,1	0
alfa [x] [y]	alfa1... alfa2	1	0,1	
	alfa2... alfa3	0	0,2	0
	alfa3... alfa4	0	0,3	
	alfa4... alfa5	0	0,4	1
	alfa5... alfa6	0	0,5	
r_type ()	1	1	0,1	0
	2	0	0,2	
	3	0	0,3	0
l [x] [y]	l1... l2	1	K*rand ()	
	l2... l3	1	K*rand ()	0
	l3... l4	1	K*rand ()	
	l4... l5	1	K*rand ()	0
	l5... l6	1	K*rand ()	

мой анализа производства–потребления кислорода в территориальном и глобальном масштабах. Низкое содержание кислорода в воздухе приводит к снижению умственной активности, ухудшению восприятия и состояния здоровья. При этом необходимо учитывать тот факт, что на окисление органики потребуется на 2,8–3,7% кислорода больше, чем его выделяется в процессе фотосинтеза этим же объемом органики. Помимо фотосинтеза, существуют и небиологические процессы, пополняющие запасы газообразного кислорода на Земле: фотолиз закиси азота и эффект фотодиссоциации водяного пара в верхних слоях атмосферы,

но они незначительны. Есть еще один малоизученный и видимо мощный небиологический источник кислорода — радиолитиз воды в земной коре и океанах [9]. Антропогенное потребление кислорода в мире неуклонно растет вместе с ростом численности населения Земли и производства энергии. Так, за 15 лет (1980–1995 гг.) численность населения возросла с 4,45 до 5,57 млрд чел. (в 1,25 раза), а промышленное потребление кислорода — с 25,3 до 30,7 млрд т. в год (в 1,21 раза). Данные со станций мониторинга атмосферы свидетельствуют о тенденциях уменьшения глобального содержания кислорода [4].

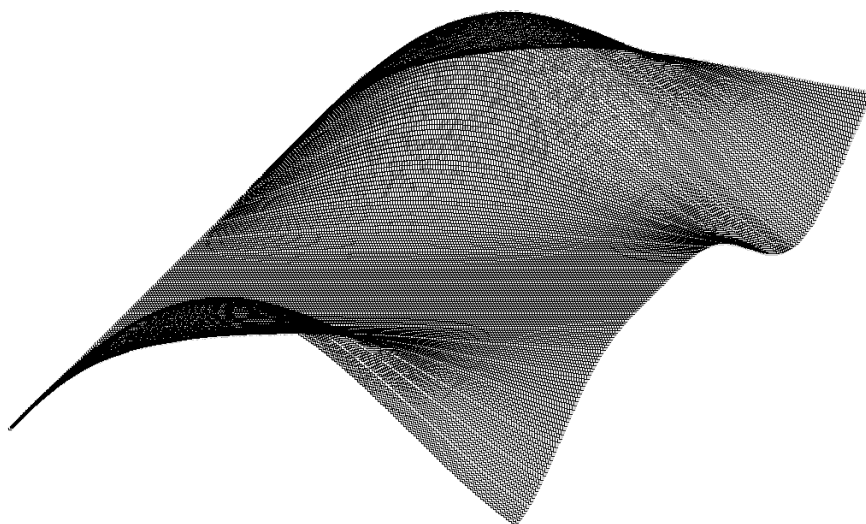


Рис. 4. Результат работы экспертной системы (распределение областей с толщиной слоя l_{xy} для протяженной территории)

Многообразие источников и стоков атмосферного кислорода и недостаточная информация о факторах, влияющих на их интенсивность, существенно затрудняют количественную оценку современного уровня фоновое содержания кислорода в нижних слоях атмосферы и тенденций его пространственно-временных изменений в крупных регионах и глобальном масштабе [4].

Важность изучения проблемы кислорода очевидна, поэтому все более востребованным является поиск новых методов исследования. Так как источники и стоки кислорода пространственно распределены, возникают следующие задачи:

- анализ интенсивности производства – потребления для отдельно взятых источников-стоков;
- моделирование перераспределения кислорода и других газов, выделяемых при его потреблении, в атмосфере в результате диффузии и турбулентного перемешивания воздушных масс.

При такой постановке возникает вопрос о методах обработки большого количества данных, взятых из результатов эмпирических исследований, полученных в ходе геологических экспедиций и на основе анализа

снимков из космоса. Поэтому в этой задаче также необходима разработка экспертной компьютерной системы, способной обрабатывать данные об источниках и стоках кислорода и давать оценку динамики такого процесса в региональных и мировых масштабах.

Построим экспертную систему для анализа более простой частной задачи, связанной с процессами горения природного торфа.

Частная вычислительная задача о торфяных пожарах

На сегодняшний день особой проблемой, широко освещаемой в прессе, являются горящие торфяники в Подмосковье. По данным МЧС России, за сутки в Подмосковье появляются около 60 новых лесных и торфяных пожаров на общей площади почти в 50 га (рис. 5).

Дым от них приносит такой же вред, как выкуривание 2 пачек сигарет за несколько часов. Однако дым — это видимая часть проблемы. При горении торф поглощает кислород и производит CO_2 , SO_2 и H_2O . Снижение кислорода на 30–50% приводит к гипоксии

(нехватка кислорода), что способствует возникновению серьезных заболеваний. Проанализируем процентное снижение кислорода в окрестностях территории возгорания торфяников, используя существующую методику оценки [10] потребления кислорода в результате горения твердых и жидких веществ, а также оценим влияние горящих торфяников на содержание кислорода и других газов в атмосфере.

Представим источник газов (сток для кислорода) в виде параллелепипеда площадью основания 1 м^2 и высотой (толщина слоя, участвующего в горении) — D . Зная время T сгорания данного выделенного количества торфа, можно определить степень влияния процессов горения на состояние атмосферы. Известно, что при сгорании 1 кг торфа требуется $0,910 \text{ кг}$ кислорода.

Рассматривая территориальные масштабы порядка $1\text{--}10 \text{ км}$, будем считать источники точечными. Принимая во внимание, что источники l и распределены они территориально, воспользуемся решением уравнения турбулентной диффузии для стационарного точечного источника производительностью Q [8] для оценки процентного снижения содержания кислорода при небольших скоростях ветра $3\text{--}4 \text{ м/с}$. Следует отметить, что кислород является поглощаемым на границе Z за счет процессов горения. Так как толщина слоя сгораемого



Рис. 5. Карта торфяных пожаров в Московской области, 2010 г.

торфа неизвестна, рассмотрим 4 сценария процессов сгорания при различных значениях слоя торфа D (табл. 3).

Вычислительный эксперимент показал, что процентное снижение содержания кислорода в атмосфере существенно зависит от толщины слоя сгораемого торфа. Наиболее опасная область, где процентное содержание кислорода снижено более чем на 10% , — в пределах нескольких десятков метров от места возгорания. Для крупного города, где потребление кислорода повышается за счет большого скопления транспорта,

Таблица 3

Процентное снижение содержания кислорода в атмосфере при различных значениях толщины горящего торфа

Толщина слоя сгораемого торфа, D (м)	Протяженность области по оси x			
	Снижение содержания кислорода в атмосфере, %			
	10–1	1–5	5–10	>10
0,05	200	50	10	—
0,25	700	200	50	10
0,50	1050	280	80	20
0,75	1350	350	100	35

наличия производств и высокой численности населения, снижение кислорода на 1–5% в результате торфяных пожаров также может оказаться существенным. Поэтому проблема оценки вклада новых потребителей кислорода в общей схеме производства–потребления оказывается весьма важной. На рисунке 8 представлена визуализация результатов вычислений по проблеме потребления кислорода из-за торфяных пожаров.

Особенности разработки экспертной системы по проблеме кислорода

Построим экспертную систему, которая позволит определить предельно допустимые масштабы горящих торфяников. В качестве входных значений, полученных по данным мониторинга, возьмем скорость ветра, температуру и влажность воздуха (так как они влияют на активность горения). В вычислительных экспериментах получим результаты распределения некоторой примеси в атмосфере при скорости ветра u и мощности источника Q , которая определяется толщиной слоя горящего торфа и площадью территорий, охваченных пожаром.

Итак, для задачи оценки потребления кислорода вследствие процессов горения выделяем следующие входные–выходные данные:

1) для определения условий:

- скорость ветра, u_{xy} ;
- влажность β_{xy} , температура воздуха

T_{xy} ;

- толщина слоя горящего торфа D_{xy} ;
- территориальное распределение стоков кислорода, определяемое множеством пар координат: $\{x_p, y_f\}, p, f = 1, 2, \dots$;

2) соответствие:

- процентное снижение содержания кислорода q_{xy} .

Эта задача, в отличие от предыдущей, должна быть разбита на две взаимосвязанные подзадачи:

1) описание в форме математической модели территориальной схемы стоков кислорода;

2) проведение вычислительных экспериментов в подзадаче анализа переноса воздушных масс в результате турбулентного перемешивания в соответствии с принятой математической моделью.

Так как при решении задач переноса получаем общий вид распределения, а концентрация примеси в некоторой области пространства пропорциональна мощности источника, для построения экспертной системы можно воспользоваться результатами серии вычислительных экспериментов для разных атмосферных условий. Представим эту часть экспертной системы в форме логической схемы, изображенной на рис. 6.

Теперь необходимо задать распределение стоков кислорода в пространстве. Возможны следующие варианты.

Сценарий 1: участки территории с $\sqrt{2}n^2$ стоками, имеющими одинаковые характеристики D_{xy} , для которых концентрации можно получить, используя выражение вида:

$$q = \sum_{p,f=-n}^n q_{x-p,y-f}. \quad (4)$$

Сценарий 2: неравномерное распределение стоков с одинаковыми характеристиками D_{xy} :

$$q = \sum_{p,f=-n}^n G(x-p,y-f)q_{x-p,y-f}. \quad (5)$$

Сценарий 3: равномерное распределение стоков с различными характеристиками D_{xy} , определенными по результатам мониторинга с использованием теоретических оценок:

$$q = \sum M(x-p,y-f). \quad (6)$$

Сценарий 4: неравномерное распределение стоков с различными характеристиками D_{xy} , определенными по результатам мониторинга с использованием теоретических оценок:

$$q = \sum_{p,f=-n}^n G(x-p,y-f)M(x-p,y-f). \quad (7)$$

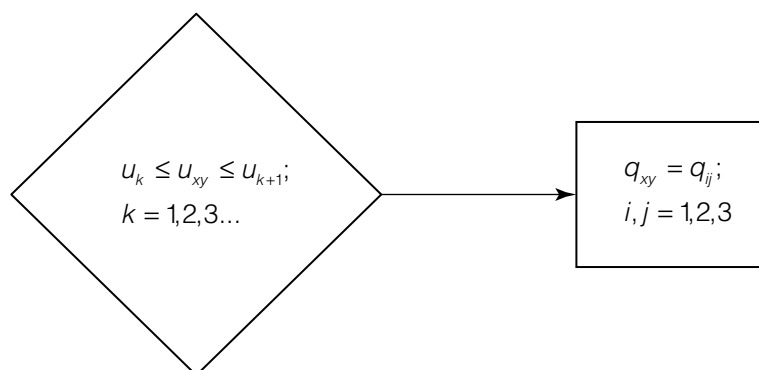


Рис. 6. Схема описания взаимосвязей между данными:

$u_k \leq u_{xy} \leq u_{k+1}$ — условие для скоростей ветра;

$k = 1, 2, 3...$ — соответствие условию;

$q_{xy} = q_{ij}, i, j = 1, 2, 3...$ — концентрации примеси

Для экспертной системы в базе знаний формируем информацию о вариантах распределения стоков (рис. 7). При этом учитываем, что в сценариях 2–4 возможны вложенные условия.

Особенности нейронной сети в задаче оценки стоков кислорода

Для определения входных сигналов (аналогично предыдущей задаче) необходимо

иметь данные, полученные по результатам мониторинга, заложенные в базу знаний. Однако на сегодняшний день ситуация такова, что на территории Российской Федерации не существует метеостанций, на которых проводились бы замеры содержания кислорода в атмосфере. Поэтому для сопоставления в экспертной системе можно использовать только косвенные оценки. Например, за основу могут быть взяты результаты замеров содержания угле-

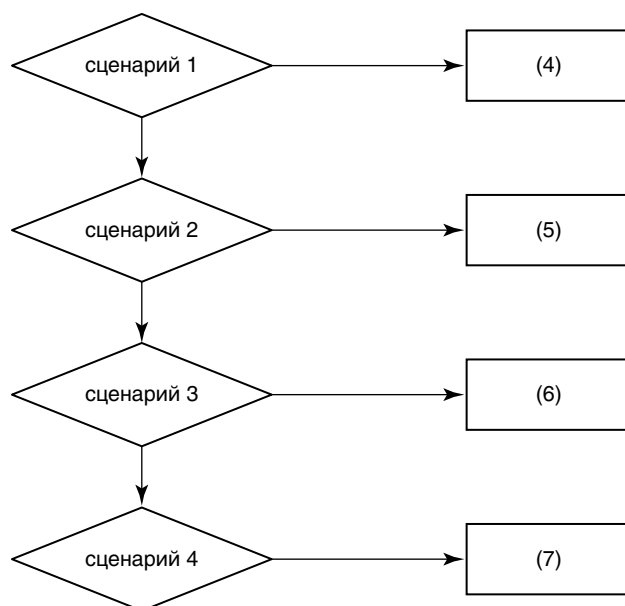


Рис. 7. Схема выполнения сценариев распределения стоков кислорода в программе

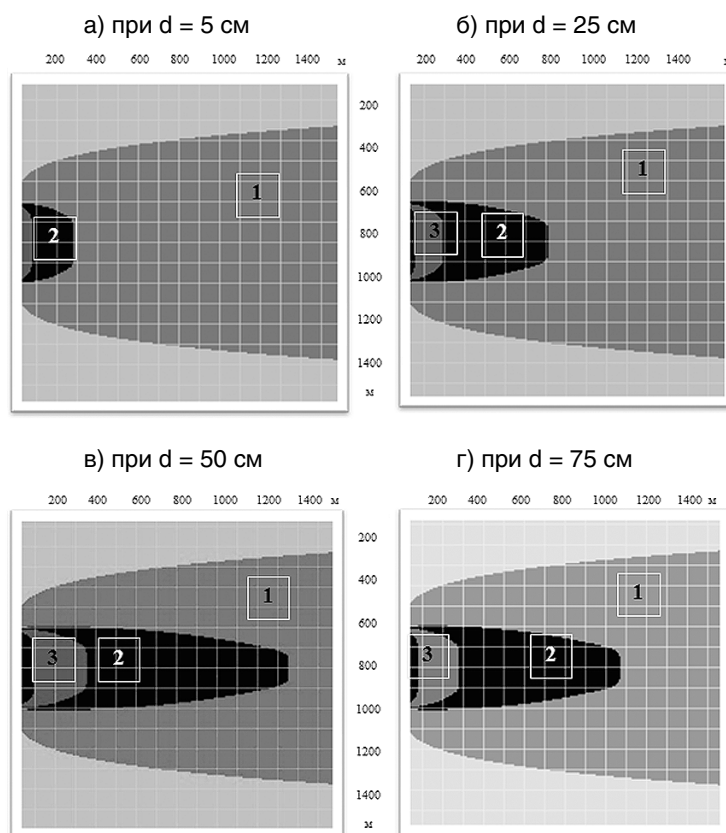


Рис. 8. Оценка процентного снижения кислорода в результате горения торфяников (область 1 — $<10^{-2}\%$; область 2 — $<10^{-1}\%$; область 3 — $<1-5\%$)

кислого газа в атмосфере. Зная первоначальный уровень процентного содержания CO_2 и отношение количества поглощенного кислорода к количеству выделенного CO_2 , можно уточнить параметры стока кислорода.

Итогом работы экспертной системы является степень влияния на организм человека процентного снижения содержания кислорода в атмосфере:

- не влияет;
- влияет в малой степени;
- существенно влияет;
- значительно влияет;
- вызывает болезненные состояния;
- опасный уровень снижения.

На рисунке 8 изображены возможные варианты классификации территорий по

степени влияния процентного снижения кислорода.

Выводы по задаче 2

Таким образом, для решения задачи влияния торфяных пожаров на процентное снижение содержания кислорода можно применять экспертные системы с элементами нейросетевого моделирования. Ценность экспертной системы, построенной только для решения задачи процентного снижения содержания кислорода в атмосфере, в узком контексте исследования торфяных пожаров сомнительна. Однако в статье эта задача приведена в качестве примера применения. Существует острая необходимость разработки экспертной сис-

темы для анализа глобальных процессов потребления–производства кислорода в атмосфере.

Заключение

На сегодняшний день проблема теоретического исследования территориально протяженных природных объектов создает условия для активного поиска новых методов анализа данных мониторинга в их взаимосвязи с существующими в соответствующей области математическими моделями. Информационные технологии открывают в этом плане широкие возможности. Представленные в статье экспертные системы для анализа небольших актуальных исследовательских задач дают понимание об основных принципах и методах обработки данных, возможных направлениях развития взаимодействия геофизики и информатики.

Построение экспертной системы для решения задач природопользования включает в себя следующие последовательные действия:

- 1) поставить задачу исследования, описать соответствующую систему, определить входные и выходные данные для территории;
- 2) построить структурную модель взаимосвязи элементов системы;
- 3) определить требуемые вычислительные эксперименты для анализа исследуемой проблемы;
- 4) ввести в базу знаний результаты вычислительного эксперимента;
- 5) проанализировать входные данные для каждой области территории с использованием данных из базы знаний;
- 6) провести анализ полученных результатов.

Попытки построить экспертные системы для анализа проблем природопользования натолкнули авторов на мысль о возможности применения экспертных систем для решения задач анализа безопасного развития природных систем в условиях активного воздействия антропогенных факторов.

Список литературы

1. Бадахова Г. Х., Кнутас А. В. Ставропольский край: современные климатические условия. Ставрополь: ГУП СК «Краевые сети связи», 2007. — 272 с.
2. Винокуров И. Ю. Эволюция почвенных экосистем. Химическое загрязнение. Саморегуляция. Самоорганизация. Устойчивость. М.: Юркнига, 2007. — 320 с.
3. Долгоносков Б. М. Нелинейная динамика экологических и гидрологических процессов. М.: УРСС, 2009. — 410 с.
4. Егоров В. И. Проблемы и методы мониторинга атмосферного кислорода // Материалы международного регионального координационного совещания по теме «Кислород и окружающая среда». Таллин, 2001. С. 109–110.
5. Крылов С. С., Бобров Н. Ю. Фракталы в геофизике. СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2004. — 138 с.
6. Малиновская Е. А. Аналитическое и численное моделирование процессов на границе атмосфера — поверхность песчаной почвы при ветре. Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. Ставрополь, 2008.
7. Малиновская Е. А. Модели безопасного развития человеко-технических и экологических систем // Прикладная информатика. №2 (26). 2010. С. 123–127.
8. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидродинамика. Т. 1. СПб.: Гидрометиздат, 1992. — 694 с.
9. Пихлак А.-Т. А., Малютин Ю. С. Необходимость учета потребления кислорода атмосферы и эмиссии «парниковых» газов при промышленном использовании горючих полезных ископаемых // Маркшейдерия и недропользование. №3 (29). 2007. С. 47–54.
10. Пихлак А.-Т. А. Проблема кислорода: потребление, воспроизводство, ресурсы // Экологическая химия. №9 (3). 2000. С. 151–174.
11. Пихлак А.-Т. А. О промышленном потреблении кислорода атмосферы в Эстонии // Экологическая химия. № 14 (3). 2005. С. 163–180.
12. Сердюцкая Л. Ф. Системный анализ и математическое моделирование экологических процессов в водных экосистемах. М.: УРСС, 2009. — 144 с.