



УДК 63:528.921:004.032.26

В.К. КАЛИЧКИН, доктор сельскохозяйственных наук, первый заместитель председателя,
А.И. ПАВЛОВА*, кандидат технических наук, доцент

*Сибирское региональное отделение Россельхозакадемии,
*Новосибирский государственный университет экономики и управления
e-mail: kvk@ngs.ru*

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ЭРОЗИОННЫХ ЗЕМЕЛЬ

Предложен методический подход к классификации эрозионных земель, основанный на использовании нейронной экспертной системы, интегрированной с ГИС. Классификация эрозионных земель осуществляется с помощью выделения операционно-территориальных единиц по космическим снимкам, разработки частных шкал оценок, формирования базы знаний для обучения нейронной экспертной системы, обучения сети и отображения результатов на ГИС-карте. Показано, что использование в качестве операционно-территориальных единиц нерегулярной сети геотопов позволяет более точно установить границы элементарных участков земной поверхности, обладающих рядом сходных характеристик. Интеграция морфометрических характеристик и метода пластики позволила более объективно выделить структурные линии рельефа для картографирования элементарных поверхностей.

Ключевые слова: эрозионные земли, искусственные нейронные сети, геоинформационные системы, геотоп.

Современные задачи в области автоматизированной оценки земель сельскохозяйственного назначения связаны с обработкой больших объемов тематически ориентированной информации, а также со сложностью построения математической модели объекта исследования. Кроме того, при классификации различных таксономических единиц в системе агроэкологической оценки земель исследователь имеет дело с неясностью информации, поскольку доступные ее источники интерпретируются в большинстве случаев неопределенно. В связи с этим выделение групп земель с помощью общепринятых количественных методов анализа данных представляется недостаточным. Исследования, связанные с развитием и использованием в прикладных целях гибридных интеллектуальных систем, актуальны. Особенность таких систем состоит в интеграции различных технологий обработки информации, представляющих собой синтез геоинформационных и экспертных систем, а также искусственных нейронных сетей [1, 2]. Среди множества задач, решаемых с помощью нейронной экспертной системы (НЭС) в различных областях человеческой деятельности, выделяют классификацию, прогнозирование, принятие решений, распознавание образов, ассоциативную память, снижение размерности данных и др. [3, 4].

Цель исследования – разработать подход, основанный на использовании НЭС, интегрированной с ГИС, и реализовать его в задачах классификации земель, подверженных водной эрозии при региональном среднемасштабном картографировании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходными материалами для классификации эрозионных земель на примере южно-таежно-лесной подзоны Омской области служили космические снимки Landsat-7 ETM+, топографическая карта М 1 : 100 000 (создана Западно-Сибирским филиалом ФГУП “Госземкадастръемка” ВИСХАГИ), почвенная карта М 1 : 600 000, карта природно-сельскохозяйственного районирования М 1 : 400 000.

Тематическую обработку космического снимка осуществляли с помощью методов визуального и автоматического дешифрирования программным комплексом ENVI. Это дало возможность составить карту земных покровов территории и создать электронную карту ландшафтных контуров в векторном формате ГИС MapInfo [5]. Кроме того, результаты распознавания снимков позволили изучить структуру ландшафтов и почвенного покрова, определить масштабы сельскохозяйственного освоения территории.

Для построения частных шкал оценок, необходимых для классификации эрозионных земель, привлекали результаты научных исследований на территории Омской области [6, 7].

Исходная информация об изучаемой территории, поступающая на входы НЭС, представляется в виде двумерной матрицы R размерности $n \times m$, т.е. $R = \{x_{ij}\}$ ($i = 1, 2, \dots, n$, где n – число строк в базе данных (БД), или число операционно-территориальных единиц (ОТЕ); $j = 1, 2, \dots, m$, где m – число полей БД, или число тематических свойств (K_j), используемых для классификации эрозионных земель.

При этом каждая ОТЕ описывается в виде вектора данных по набору тематических свойств объектов: $K_m = \{K_i\} = (K_1, K_2, \dots, K_7)$ – и представляет собой упорядоченное множество атрибутивных свойств слоя ОТЕ, или множество критериев оценки состояния объекта исследования.

По каждому критерию K_j имеется шкала оценки с порогами ограничений, задаваемая экспертно, и считается определенным некоторое множество возможных оценок

$$S_j = (k_1^j, k_2^j, \dots, k_w^j),$$

где w – число градаций критерия оценки. Оценки S_j упорядочены по убыванию характерности для свойства G .

Свойство G определяется экспертно на этапе составления частных шкал оценок (степень горизонтального расчленения территории, глубина расчленения территории овражно-балочной сетью и др.) и отвечает целевому критерию задачи классификации эрозионных земель.

Целевой критерий задачи классификации сводится к отнесению каждой ОТЕ к одному из заданных классов решений (C_1 – неэрозионные земли, C_2 – слабоэрозионные, C_3 – среднеэрозионные, C_4 – сильноэрозионные и C_5 – очень сильноэрозионные). Таким образом, задача классификации состоит в распределении n объектов из имеющихся на исходной карте ОТЕ к одному из классов решений.

При построении БЗ использовали совокупность объектов с граничными показателями при послойном наложении соответствующих карт.

По структуре разработанная НЭС реализует многослойный персептрон с двумя скрытыми слоями. Каждый вектор входных данных, используемых для обучения нейронной сети, задавался следующим образом:

$$K_m = \{K_i\} = (K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7),$$

где K_i – значение показателя из набора признаков, ранжированных по порогам ограничений.

Для обучения сети использовали алгоритм обратного распространения ошибки как наиболее эффективный. Применена также непрерывная униполярная сигмоидальная функция активации следующего вида:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-as}},$$

где a – коэффициент, характеризующий крутизну сигмоидальной функции.

В числе особенностей сигмоидальной функции активации выделяют способность усиливать слабые сигналы и предотвращать насыщение сети большими сигналами [3].

Процесс обучения многослойного персептрона осуществлялся итеративно для каждой группы эрозионных земель с помощью ПО SPSS.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения степени развития эрозионных процессов и составления средне- и мелкомасштабных карт эрозионных земель большое значение имеют морфометрические показатели рельефа [7–9]. В связи с этим частные шкалы оценок сформированы в БД по следующим показателям (табл. 1).

Таблица 1

**Фрагмент частных шкал оценок по степени проявления отдельных признаков
для классификации эрозионных земель**

Градации по горизонтальному расчленению рельефа, км/км ²	Степень расчленения территории линейными формами рельефа	Группа земель
0–0,3	Нерасчлененные	Неэрозионные
0,3–0,5	Слаборасчлененные	Слабоэрозионные
0,5–1,0	Среднерасчлененные	Среднеэрозионные
1,0–1,5	Сильнорасчлененные	Сильноэрозионные
Более 1,5	Очень сильнорасчлененные	Очень сильноэрозионные
Градации по глубине местных базисов эрозии, м	Степень расчленения территории по базисам эрозии	Группа земель
Менее 5	Нерасчлененные	Неэрозионные
5–20	Слаборасчлененные	Слабоэрозионные
20–40	Среднерасчлененные	Среднеэрозионные
40–50	Глубокорасчлененные	Сильноэрозионные
Более 50	Очень глубокорасчлененные	Очень сильноэрозионные

Разработку базы знаний (БЗ) осуществляли сбором атрибутивной информации из тематических слоев ГИС в единую БД, структуру которой задавали по критериям оценки: углу наклона рельефа (K_1), горизонтальному расчленению рельефа (K_2), глубине базиса эрозии (K_3), расчленению западинными формами рельефа (K_4), длине (K_5) и экспозиции склонов (K_6), почвообразующей породе (K_7). Тематические наборы показателей описаны в таблицах частных шкал оценок с ранжированием порогов ограничений.

Данные табл. 2 включают знания экспертов и хранятся в БД MS ACCESS. В структуре БД определено поле, содержащее уникальный идентификатор ID, указывающий номер операционно-территориальной единицы (ОТЕ) при визуализации результатов классификации.

Пространственно-координатная привязка результатов обучения НЭС обычно осуществляется с ОТЕ, в качестве которых используют ячейки регулярной или нерегулярной сетки [10–12]. В нашей работе территориальная привязка результатов обучения НЭС осуществлялась через геотопы, образующие в пространстве сеть нерегулярных контуров. При этом геотоп, согласно А.Н. Ласточкину, представляет собой элементарный участок земной поверхности, обладающий в достаточной мере неизменными характеристиками (уклон, подстилающие породы, экспозиция склонов) [13].

Для детализации генетических поверхностей и разбиение их на элементарные участки создана карта пластики рельефа путем установления точек нулевой плановой кривизны и соединения их изолинией – морфоизографой по методу И.Н. Степанова [14].

Использование метода пластики рельефа и морфометрических карт позволило более объективно выделить структурные линии рельефа для картографирования элементарных поверхностей. Показано, что пространственная структура геотопов образует инвариант геосистемы, относительно устойчивый каркас, определяющий пространственно-временной набор процессов распределения важнейших потоков (тепла, влаги, минеральных и химических веществ). Нерегулярная сеть геотопов послужила картографической основой для классификации эрозионных земель.

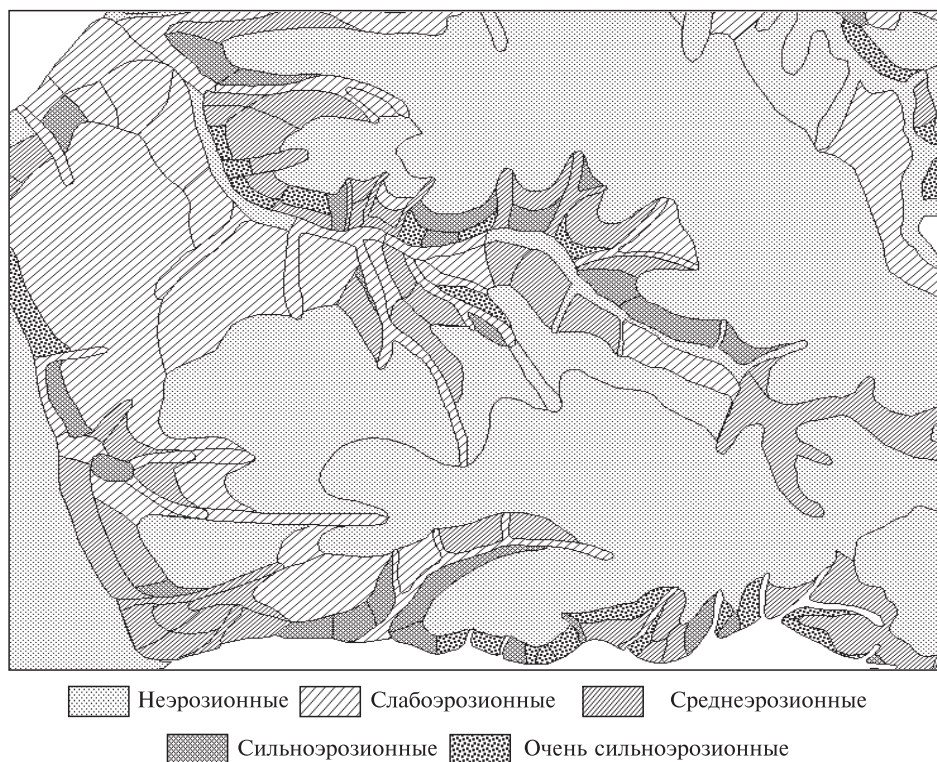
В результате интеграции НЭС и ГИС получены цифровые среднемасштабные карты эрозионных земель и обобщенные нормативные показатели их морфометрических свойств (см. рисунок, табл. 3).

Результаты классификации эрозионных земель отражают их пространственное распространение. На изученной территории большую часть – 62 % (5343 га) – занимают неэрозионные земли, расположенные на плоских во-

Таблица 2

Фрагмент базы знаний, используемой для обучения НЭС

ID	Горизонтальное расчленение (K_1), км/км ²	Порог ограничения для K_1	Глубина базисов эрозии (K_2), м	Порог ограничения для K_2	Угол наклона рельефа (K_3), град	Порог ограничения для K_3	Группа земель
4	0,67	0,3–0,5	5	5–10	0°49'	Менее 0,5	Слабоэрозионные
11	0,93	0,5–1,0	15	10–20	2°45'	1,5–3	Среднеэрозионные
43	1,82	1,5–2,0	45	20–50	4°08'	1,5–3	Сильноэрозионные
59	1,23	1,5–2,0	35	20–50	3°09'	1,5–3	»



Фрагмент цифровой карты группировки эрозионных земель южно-таежно-лесной подзоны Омской области в междуречье Иртыш – Уй (М 1 : 50 000)

Таблица 3

Границы изменений (в числителе) и средние показатели (в знаменателе) эрозионных земель по морфометрическим свойствам

Морфометрические свойства	Земли			
	слабоэрозионные	среднеэрозионные	сильноэрозионные	очень сильноэрозионные
Угол наклона рельефа, град.	$\frac{1^{\circ}34' - 3^{\circ}29'}{2^{\circ}35'}$	$\frac{3^{\circ}34' - 5^{\circ}55'}{4^{\circ}45'}$	$\frac{6^{\circ}00' - 7^{\circ}54'}{7^{\circ}00'}$	$\frac{8^{\circ}07' - 12^{\circ}27'}{9^{\circ}56'}$
Горизонтальное расчленение гидрографической сетью, км/км ²	$\frac{0,3 - 0,6}{0,5}$	$\frac{0,6 - 0,9}{0,7}$	$\frac{1,0 - 1,2}{1,1}$	$\frac{\text{золее } 1,2}{1,3}$
Глубина базисов эрозии, м	Менее 20	20–30	30–40	Более 40
Расчленение озерно-западинными формами рельефа, шт./100 км ²	Менее 5	Менее 5	Менее 5	Менее 5

дораздельных равнинах при небольших базисах эрозии – до 10 м. Слабоэрозионные земли занимают 22 % (1908 га) территории и формируются на плоских и слабоволнистых равнинах с углами наклона от 0 до 3,5° и глубиной базисов эрозии до 15 м. Среднеэрозионные земли занимают 11 % (989 га) и залегают на полого-увалистых равнинах по приречным склонам с углами наклона от 3 до 5,5° и глубиной базисов эрозии 20–30 м.

Сильноэрозионные земли составляют 3 % (256 га) от изучаемой территории и расположены на полого-увалистых равнинах по склонам рек с углами наклона от 6 до 8° и глубиной базисов эрозии 30–40 м. Очень сильноэрозионные земли встречаются на небольшой территории – 2 % (155 га) – на глубоководно-расчлененных равнинах с глубиной базисов эрозии более 40 м.

Информация о распространении на определенной территории процессов водной эрозии и их интенсивности может послужить базовой основой для расчетов потенциального смыва почв, а также разработки приемов защиты почв от эрозии в адаптивно-ландшафтных системах земледелия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс классификации эрозионных земель по существу является итерационным и сводится к тематической обработке космических снимков с выделением контуров на исследуемой территории, формированию ГИС территории путем интеграции различных материалов в виде растровых и векторных слоев, сбору и систематизации научных данных для построения частных шкал оценок степени развития эрозионных процессов, разработке картографической БД в виде слоев ГИС, интегрированию полученных знаний о территории в БЗ и выполнению вычислительных экспериментов по обучению НЭС, использованию обученной НЭС для классификации эрозионных земель, оформлению электронных карт эрозионных земель с соответствующими БД.

Использование в качестве ОТЕ нерегулярной сети геотопов позволило объективно установить границы между элементарными участками земной поверхности, обладающие сходными показателями по углам наклона, экспозиции склонов, подстилающим породам. Разработанный подход позволяет автоматизировать трудоемкий процесс группировки эрозионных земель при составлении среднемасштабных карт, а также систематизировать сведения о морфометрических показателях и топологии эрозионных земель.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилов А.В. Гибридные интеллектуальные системы. – Новосибирск, 2003. – 163 с.
2. Каличкин В.К., Павлова А.И. Применение непараметрической статистики в геоинформационном анализе топологии переувлажненных земель // Сиб. вестн. с.-х. науки. – 2012. № 2. – С. 5–11.
3. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / пер. с англ. – 2-е изд. – М.: ИД Вильямс, 2006. – 1103 с.
4. Барский А. Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2007. – 175 с.
5. Kalichkin V.K., Pavlova A.I. Application of Automated Geoimage analysis methods for Agro-Ecological Assessment of Lands // Bulg. Journ. of Agric. Sci. – 2011. – Vol. 17, N 5. – P. 649–654.
6. Рейнгард Я.Р. Деградация почв экосистем юга Западной Сибири. – Омск, Лодзь [Польша], 2009. – 634 с.
7. Рейнгард Я.Р. Эрозия почв и изменение почвенного покрова Омской области. – Омск: Вариант, 2011. – 205 с.
8. Ларионов Г.А. Эрозия и дефляция почв: основные закономерности и количественные оценки. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 200 с.
9. Танасиенко А.А. Специфика эрозии почв в Сибири. – Новосибирск, 2003. – 176 с.
10. Кирпичева Е.Ю., Кузнецов В.В. Методика геолого-прогнозного моделирования // Геоинформатика. – 2006. – № 2. – С. 58–61.
11. Кирпичева Е.Ю. Решение геолого-прогнозных задач на основе базы экспертных знаний о поисковых признаках эталонных объектов // Sanse.ru: электрон. журн. «Системный ана-

лиз в науке и образовании». – 2009. – Вып. 4. – [электронный ресурс]: URL: <http://www.sanse.ru>

12. **Тикунов В.С.** Классификация в географии: ренессанс или увядание? (опыт формализованных классификаций). – М.; Смоленск, 1997. – 367 с.
13. **Ласточкин А.Н.** Системно-морфологическое основание наук о Земле: (Геотопология, структурная география и общая теория геосистем). – СПб., 2002. – 762 с.
14. **Степанов И.Н.** Теория пластики рельефа и новые тематические карты. – М.: Наука, 2006. – 230 с.

Поступила в редакцию 03.10.2014

**V.K. KALICHKIN, Doctor of Science in Agriculture, First Vice-Chairman,
A.I. PAVLOVA*, Candidate of Science in Engineering, Associate Professor**

*Siberian Branch of the Russian Academy of Agricultural Sciences,
*Novosibirsk State University of Economics and Management
e-mail: kvk@ngs.ru*

APPLICATION OF NEURAL EXPERT SYSTEM O CLASSIFY ERODIBLE LANDS

A methodical approach to classification of erodible lands based on using a neural expert system integrated with GIS has been suggested. Classification of erodible lands is realized by selecting operational-territorial units from satellite imagery, developing particular rating scales, forming knowledge bases to teach a neural expert system, teaching a network, and imaging results in the GIS map. The use of irregular geotop network as operational-territorial units allows more precisely determining the bounds of elementary plots of the Earth surface possessing a number of similar characteristics. Integration of morphometric characteristics and the plasticity method made it possible to more objectively select structural lines of the relief to draw a map of elementary surfaces.

Keywords: erodible lands, artificial neural networks, geoinformation systems, geotop.

УДК 631.416.2:631.51: 631.559(571.1)

**В.Е. СИНЕШЕКОВ, доктор сельскохозяйственных наук, заведующий лабораторией,
Г.И. ТКАЧЕНКО, кандидат биологических наук, заведующая лабораторией**

*Сибирский научно-исследовательский институт земледелия
и химизации сельского хозяйства
e-mail: sivi_01@mail.ru*

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПОДВИЖНОГО ФОСФОРА В ПОЧВЕ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ ОСНОВНОЙ ОБРАБОТКИ

Изучены в длительном стационарном опыте (33 года) особенности сезонной динамики подвижного фосфора в черноземе выщелоченном без внесения минеральных удобрений при минимальных обработках. Выявлена его дифференциация в верхних горизонтах почвенного профиля в зернопаровом севообороте в лесостепи Западной Сибири. Установлено, что парование почвы способствовало повышению этого элемента в слое 0–20 см во всех вариантах механической обработки от средней обеспеченности (0,55–0,64 мг/кг) весной до повышенной (0,70–0,95 мг/кг) к осени. За период парования наиболее благоприятные условия для накопления почвенных фосфатов складывались в черном пару с глубокой безотвальной обработкой: количество P_2O_5 увеличилось на 73 %. В черном пару с минимальной обработкой содержание P_2O_5 повысилось на 45 %, в раннем минимальном пару – на 16 и в черном пару со