

С.А. ДУБРОВСКАЯ, Р.В. РЯХОВИнститут степи УрО РАН, 460000, Оренбург, ул. Пионерская, 11, Россия,
skaverina@bk.ru, remus.rv@gmail.com**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ
ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ СТЕПНОЙ ЗОНЫ**

На основе методики автоматизированной классификации искусственных нейронных сетей построена интегральная картографическая модель генетических типов рельефа и структурно-функционального зонирования г. Оренбурга с использованием геоморфометрических данных для выявления пространственно однородных участков ландшафтных структур урбогеосистемы. Способ спектральной классификации без учителя позволяет провести пространственную дифференциацию урботехногеосистем и получить достоверную информацию, которая необходима для улучшения экологических составляющих и комфорта городского пространства. Данные о рельефе и свойствах подстилающей поверхности — неоднородные величины, которые приводятся к единому дискретному виду. Для этого на этапе обработки привлекаются современные эффективные инструменты ГИС, создающие высокоточные аналитические и картографические материалы, которые обрабатываются и представляются в виде грид-структур. На основе метода Self Organizing Map проведены типологическая генерализация операционно-территориальных единиц, тематическая интерпретация классов и составлена картографическая модель урболандшафтной дифференциации территории. Выделенные участки поймы (высокая и низкая) и притеррасная территория сосредоточены в одной ординационной плоскости нейронной сети Кохонена, но различны по характеристикам рельефа (высоте, уклону, экспозиции и другим морфометрическим показателям). Выделение 1-й и 2-й надпойменных речных террас стало возможным с привлечением данных полевых исследований и среднemasштабных геоморфологических карт. Верифицированная модель ландшафтной основы накладывается на современную схему эколого-функционального зонирования урбогеосистемы. Итоговая карта раскрывает пространственную структуру развития урботехногеосистемы. Предложенный метод искусственных нейронных сетей позволяет откорректировать полученные данные в зависимости от цели типологического картографирования. Комплексная ландшафтная классификация урбогеосистем отображает особенности географической среды и показывает закономерности техногенных воздействий, развития процессов изменения состояний природно-антропогенных геосистем.

Ключевые слова: ландшафтное картографирование, цифровая модель рельефа, геоморфометрические показатели, урбогеосистема, самоорганизующиеся карты, территориальное планирование.

S.A. DUBROVSKAYA, R.V. RYAKHOVInstitute of Steppe, UB RAS, 460000, Orenburg, ul. Pionerskaya, 11, Russia,
skaverina@bk.ru, remus.rv@gmail.com**MAPPING URBAN AREAS OF THE STEPPE ZONE USING
THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METHOD**

Based on the automated classification technique for artificial neural networks, an integrated cartographic model of the genetic types of topography and structural and functional zoning of the city of Orenburg was constructed using geomorphometric data to identify spatially homogeneous sections of landscape structures of the urbogeosystem. The spectral classification method without a teacher allows spatial differentiation of the urban technical systems and reliable information that is necessary to improve the environmental components and comfort of urban space. Data on the topography and properties of the underlying surface are inhomogeneous values that are brought into a single discrete form. To do this, at the processing stage, modern effective GIS tools are involved, creating high-precision analytical and cartographic material that is processed and presented in the form of grid structures. Based on the Self-Organizing Map method, a typological generalization of operational-territorial units, a thematic interpretation of classes, and a cartographic model of the urban landscape differentiation of the territory were compiled. The selected sections of the floodplain (high and low) and the terraces are concentrated in the same ordination plane of the Kohonen neural network but are different in terms of the characteristics of the relief (height, slope, exposure, and other morphometric indicators). The identification of the 1st and 2nd floodplain river terraces became possible with the use of field research data and medium-scale geomorphological maps. The verified model of the landscape base is superimposed on the modern scheme of the

ecological and functional zoning of the urbogeosystem. The final map reveals the spatial structure of the development of the urban technological system. The suggested method of artificial neural networks makes it possible to update data obtained according to the purpose of typological mapping. A comprehensive landscape classification of urbogeosystems is a reflection of the features of the geographical environment and shows the patterns of anthropogenic impacts, and the development of processes of changing the states of natural and anthropogenic geosystems.

Keywords: *landscape mapping, digital elevation model, geomorphometric indicators, urbogeosystem, Self-Organizing Maps, spatial planning.*

ВВЕДЕНИЕ

Частная форма трансформации ландшафта — это его нарушенность, или изменение свойств и пространственного размещения элементов геосистем по сравнению с коренным (первичным, ненарушенным) состоянием [1]. В городах, частично утративших природную составляющую, хозяйственной деятельностью человека формируется новая среда. Через преобразование рельефа городской территории не только изменяются поле высот, морфометрические и морфологические характеристики, но создаются новые ландшафтно-геоморфологические условия и антропогенно-геоморфологические системы со свойственными им особенностями функционирования [2]. Городское пространство — это сложноорганизованная морфолитодинамическая урботехногеосистема, у которой индивидуальные связи элементов природного, антропогенного и техногенного происхождения определяют условия ее функционирования. Рельеф городов вместе с подстилающими горными породами представляет собой геоструктурную основу территории, которая дополняется искусственными объектами (зданиями, сооружениями, дорогами), видоизменяющими потоки химических элементов, локальный климат и геофизическую обстановку [3]. Местами создаются особые микроклиматические условия и формируются зоны эколого-геоморфологического комфорта, обеспечивающие устойчивое развитие города в целом. Рельеф городской территории — сложная совокупность естественных, природно-техногенных и техногенных (архитектурных) форм, особый тип полигенетической и морфодинамической организованности, реализующей функции пространственного базиса деятельности населения [4].

Задача исследования — на основе созданной цифровой модели рельефа (ЦМР) топологического уровня (м-б 1:25 000) методом автоматизированной классификации рельефа по комплексу морфометрических данных с использованием искусственной нейронной сети (ИНС) и современной схемы эколого-функционального зонирования построить пространственную картографическую модель урбосреды, детерминирующую состояние природно-антропогенного комплекса. Для решения этой проблемы используется геоинформационное типологическое картографирование, позволяющее провести пространственную дифференциацию урбогеосистем.

Классификация представляет собой основную процедуру, посредством которой происходит упорядочение многообразия объектов и их динамических проявлений в географической среде. Она облегчает анализ и выявляет закономерности их дифференциации [5, 6]. Нейросетевой подход позволяет комплексно и наглядно провести систематизацию объектов по пространственным данным. Достоинством ИНС-классификации являются автоматическая настройка параметров сетевой модели без участия эксперта, универсальность и устойчивость при работе с зашумленными и негеокодированными данными, возможность дополнительного обучения сети; эффективность обработки растровой информации высокого разрешения [7–10].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объект исследования — территория г. Оренбурга, расположенная на границе трех геоморфологических районов: юго-восточной окраины возвышенности Общего Сырта правобережья Сакмары (северо-западная часть города), Урало-Сакмарского междуречья на западной низкой окраине Слудных гор (большая часть урболандшафтов) и левобережье Урала в пределах северных пологих склонов Илекского плато в южной части города. Пересекающие урбогеосистему реки Урал и Сакмара и созданные ими пойменно-террасовые комплексы представляют собой генетический тип аккумулятивных форм рельефа «долина-склон-водораздел». Эти элементы мезорельефа практически не изменились в процессе градостроительного освоения территории. В исследовании использовались результаты работ геоморфологов и геологов Саратовского университета [11, 12] по эволюции ландшафтов центральной части Оренбургской области. Расположение города Оренбурга на водораздельном пространстве Урала и Сакмары обуславливает наличие здесь нескольких генетических типов рельефа [13].

Предмет исследования — взаимосвязь морфометрических показателей рельефа урбогеосистемы с дифференциацией территории по зонам реализации разных геоэкологических функций, выделяемым при помощи качественных и количественных критериев. Обработывались пространственные данные ASTER GDEM с разрешением 30 м для ЦМР Геологической службы США (USGS), находящиеся в открытом доступе (<http://www.glovis.usgs.gov>), с использованием топографической карты города м-ба 1:25 000.

Первый этап исследования — создание банка данных — состоял в оцифровке изолиний, гидро-изогипс и положений вершин рельефа. Сформирована электронная таблица, в которую занесены 13 816 записей: координаты (X , Y) и высоты Z (м) точек рельефа. Исходная ЦМР представлена в виде грид-файла 1090×1013 регулярной сетки высот. На основе этой информации рассчитаны матрицы значений уклонов, экспозиции, кривизны склонов, которые дополняют геоинформационную базу данных и позволяют учесть ландшафтные процессы [14].

На втором этапе исследования на основе методических разработок А.А. Савельева [15] с помощью ИНС была проведена классификация объектов по топологическим и метрическим показателям. Адаптивный непараметрический метод ИНС Кохонена SOM (Self Organizing Map) — математический инструмент, позволяющий создавать надежные модели сложных природных систем [15–17]; он оптимален для автоматизированной ландшафтно-типологической дифференциации городского пространства. В отличие от обычных методов геоинформационного анализа с независимым распределением пикселей по классам, в ИНС SOM осуществляется спектральная классификация без учителя, где все искусственные нейроны и соответствующие им группы упорядочены в решетку, задающую топологию нейронной сети [18].

В ИНС объекты анализа — это операционно-территориальные единицы (ОТЕ) — пространственные элементы (пиксели, узлы регулярной сетки) со связанным набором (вектором) характеристик. Ординация (сходство) объектов представлена на плоскости в виде решетки классов, когда два геоинформационных объекта, соотносящиеся в пространстве характеристик, расположены рядом [19]. В результате реализации SOM формируется сеть классов в виде минимального остового дерева и отображения Сэммона [20].

Метод SOM, реализованный в программе ScanEx Image Processor v.5.0 (модуль ThematicPro — классификация и тематическая интерпретация), применялся для выделения однородных по сочетанию морфометрических характеристик рельефа классов ОТЕ. По результатам классификации ИНС выделено 15 классов типологических ландшафтных единиц рельефа с однородным набором характеристик. Далее проводилось объединение близких ОТЕ и создавалась картографическая модель урботехногеосистемы, в которой каждая ОТЕ геоизображения ставилась в соответствующий класс.

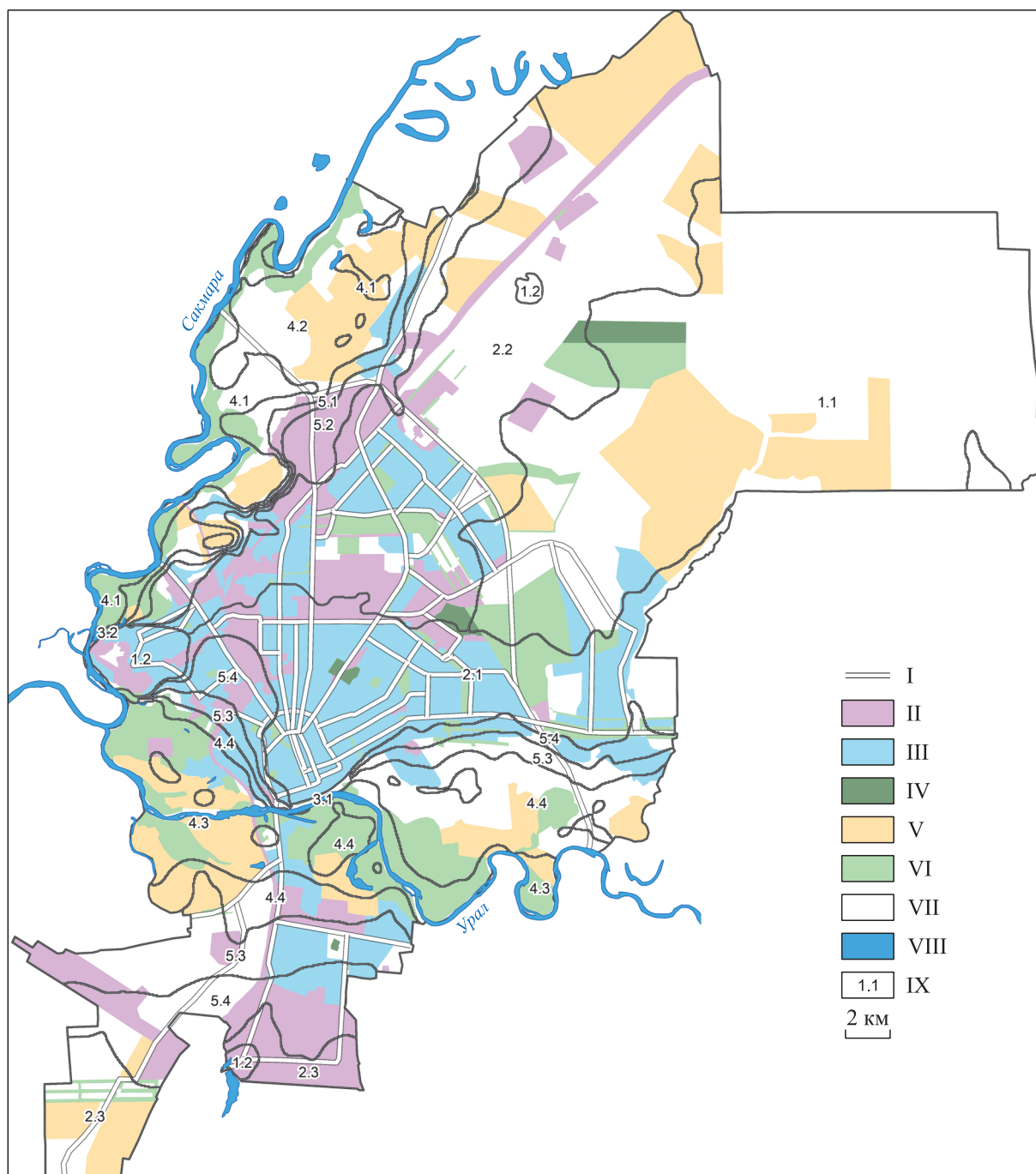
На третьем этапе исследования проводилась корректировка полученных результатов — полевое обследование городской территории для сопоставления формальных классов реальным типам урочищ. В ходе верификации оцениваются возможность и эффективность применения ИНС в пространственной дифференциации урболандшафтов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставление построенных картографических материалов с существующими геоморфологическими основами территории города показывает, что имеется хорошее совпадение границ основных генетических типов рельефа с результатами компьютерной обработки (см. рисунок, таблицу). Полевые исследования дают 90 % совпадения с расчетной классификацией; 5 % приходится на неточности при установлении границ урочищ и связаны с погрешностью данных ЦМР и с наличием ошибок выделения ИНС промежуточных классов; 5 % относится на расхождения пространственной привязки. Результаты полевых работ позволили частично скорректировать выводы по классификации ОТЕ.

Алгоритм ИНС идентифицирует равнинные поверхности — водораздельные и пойменные комплексы, причем независимо от степени их расчлененности, а также выделяет области аккумуляции (речные террасы) и денудации, а именно в солянокупольном ландшафте — останцовые горы Маяк, Сулак и Хусаинова.

Алгоритм дифференцирует водораздельную поверхность Урало-Сакмарского междуречья с пологоволнистым рельефом, где абсолютные высоты изменяются с северо-востока на юго-запад от 180–220 до 100–120 м. Селитебная часть г. Оренбурга расположена на водоразделе; высота этого участка 100–120 м (южный приуральский и северный присакмарский склоны). Водораздельные про-



Интегральная картографическая модель генетических типов рельефа и структурно-функционального зонирования г. Оренбурга.

ТГС: I — транспортная, II — промышленные, III — селитебные, IV — специального назначения, V — сельскохозяйственные, VI — рекреационные, VII — прочие. VIII — водные объекты. IX — формы рельефа (см. таблицу).

странства имеют пологие задернованные (1,5–6°) уклоны прямой или выпуклой формы, расчленены густой сетью неглубоких балок, оврагов и более мелкими эрозионными формами. Склоны южной и северо-западной экспозиции объединены в один классификационный ареал. Их дифференциация проведена с помощью показателей экспозиции — по пространственной ориентации и слабо выраженной в рельефе линии водораздела.

Тематическая классификация рельефа урботехногеосистемы по абсолютной высоте, уклонам и экспозиции

Номер форм рельефа (см. рисунок)	Элементы и формы рельефа	Уклоны поверхностей, град	Экспозиция	Средняя высота, м
Денудационный тип рельефа				
Вершинные водораздельные поверхности Урало-Сакмарского междуречья				
1.1	Пологоволнистая водораздельная возвышенность	≤3,5	SW	183,0
1.2	Изолированные округлые вершины структурно-денудационных останцов (солянокупольного происхождения)	≤6,5	NE	155,4
	гора Маяк		E	119,0
	гора Сулак		SE	133,7
	гора Хусаинова			
Эрозионно-денудационный тип рельефа				
Субгоризонтальные приводораздельные склоны Урало-Сакмарского междуречья				
2.1	Южный — приуральский склон	≤3,0	S	124,5
2.2	Северный — присакмарский склон	≤2,5	NW	125,0
Субгоризонтальные приводораздельные склоны Урало-Илекского междуречья				
2.3	Северный — приуральский склон	≤2,0	N	124,0
Аккумулятивно-денудационный тип рельефа				
3.1	Правый берег р. Урал — Беловский Яр	>7,0	S	94,5
3.2	р. Сакмара в районе горы Маяк		W	
Аккумулятивный тип рельефа речных долин				
Пойменный комплекс				
4.1	Низкая пойма р. Сакмары	≤0,5	SW	85,0
4.2	Высокая пойма р. Сакмары	≤1,0	SW	94,0
4.3	Низкая пойма р. Урал	<0,5	W	82,5
4.4	Высокая пойма р. Урал	≤0,5	SW	89,5
Террасовый комплекс				
5.1	Первая надпойменная терраса р. Сакмары	≤1,0	NW	96,0
5.2	Вторая надпойменная терраса р. Сакмары	≤2,0	NW	99,0
5.3	Первая надпойменная терраса р. Урал	≤1,5	S	95,0
5.4	Вторая надпойменная терраса р. Урал	≤1,0	S	98,5

ИНС-алгоритм кроме водоразделов идентифицирует две надпойменные террасы, объединенные в один класс, и повсеместно распространенные высокие и низкие поймы в долинах Урала и Сакмары, имеющие сходные черты строения. Им соответствует аккумулятивный тип рельефа, который широко представлен в природно-ландшафтной и планировочной структурах города. Для выделения этих морфогенетических типов проведено обследование по признакам уклона, кривизны и уступов террас; экспозиция в данном случае малоинформативна. Наибольшую по площади территорию занимает левобережная часть долины р. Сакмары. Низкая пойма представляет собой пониженные участки песчаных островов, кос и отмелей. Ее относительная высота над урезом воды составляет 2–4 м. Высокая пойма левобережья представлена широкой полосой от 0,5 до 3,5–4 км при относительной высоте от 4 до 8 м. Вышеперечисленные ландшафтные единицы отделяются друг от друга в рельефе уступом из переслаивающихся суглинков, супесей, тонкозернистого песка в верхней части, в нижней — средне- и крупнозернистыми песками с включением гравия и гальки. В притеррасной части поймы расположен ряд экологически опасных объектов (Сакмарская ТЭЦ, нефтемаслозавод, Гидропресс, завод резинотехнических изделий). Пойменно-террасовый рельеф относится к крайне неустойчивым природным образованиям ландшафта. Эти участки принадлежат к зоне повышенного риска миграции и накопления техногенных загрязнителей в разных средах. Разделение первой и второй надпойменных террас р. Сакмары происходит по относительным высотам от 14 до 16 м над уровнем уреза воды.

По результатам классификации соляные купола, выраженные в ландшафте одиночными горами-холмами, выделяются в виде замкнутых концентрических окружностей. В промышленно-селитебной зоне в северо-западной части города на левобережье р. Сакмары выделяется плосковершинный холм солянокупольного типа — гора Маяк (ландшафтно-исторический символ города). В пределах город-

ского округа также четко идентифицируются еще две вершины подобного генезиса — горы Сулак (южная часть) и Хусаинова (северная часть), представляющие собой денудационные останцы. Это изолированные поднятия округлой или слегка вытянутой формы. Геосистема соляных куполов сильно нарушена карьерами, гаражно-складскими строениями и полигонами бытовых отходов.

Для создания адекватной геоинформационной модели экологической направленности полученную ландшафтную дифференциацию урбосреды необходимо дополнить типами городских ТГС, обусловленными хозяйственной деятельностью человека (см. рисунок). В комплексное изучение территориальной структуры урбогеосистемы включается социально-экономическая сфера городского пространства, которая отражается в схемах эколого-функционального зонирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие в ландшафтном картографировании ГИС-технологии предоставляют возможность для проведения эффективного анализа многочисленных данных ландшафтных систем. Метод ИНС-алгоритмов представляет собой один из перспективных подходов, учитывающий особенности пространственной дифференциации геосистем городских территорий для создания адекватной картографической модели, которая, в свою очередь, достоверно и полно раскрывает специфику ландшафтной структуры. Данный пласт информации по природным условиям необходим для принятия квалифицированных управленческих решений в градостроительной деятельности. Опыт применения ИНС-алгоритмов для реализации комплексного районирования урбанизированной территории и развития ландшафтного планирования крупных городов используется как зарубежными, так и отечественными исследователями. Основные научные изыскания зарубежных ученых связаны с развитием городских программ по эффективному управлению природно-антропогенным пространством, мониторингу состояния биологических и ландшафтных систем с целью улучшения комфортности и сохранения качества окружающей урбосреды. Так же, как и коллеги из Европы, Америки и Азии, отечественные ученые подчеркивают значимость применения нейросетевого подхода для решения ландшафтных задач в рамках развития городов.

По итогам исследования внесены коррективы в схему территориального планирования города. Разработанная картосхема и геоинформационная база данных могут использоваться для формулировки научно обоснованных рекомендаций по экологически ориентированному природопользованию в пределах урбанизированной территории, определения природоохранных мер, включая ограничение и прекращение тех или иных воздействий на городскую среду и население, экологической экспертизы проектов объектов строительства и территориального развития города, планирования и реализации различных хозяйственных, медицинских, санитарно-технических, экологических мероприятий.

Работа выполнена в рамках плана НИР Института степи УрО РАН (ГР АААА–А17–117012610022–5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разов В.П. Картографические исследования земельных ресурсов. — Киев: Наук. думка, 1989. — 180 с.
2. Лихачёва Э.А., Кофф Г.Л., Маккавеев А.Н. Эколого-геоморфологическая оценка городской территории // Геоэкология Москвы: методология и методы оценки состояния городской среды. — М.: Медиа Пресс, 2006. — С. 27–65.
3. Кузьмин С.Б., Шаманова С.И. Принципы оценки эколого-геоморфологического дискомфорта урбанизированных территорий // Экология урбанизированных территорий. — 2010. — № 3. — С. 30–34.
4. Лихачёва Э.А. Город — антропогенная геосисема // Геоморфология городских территорий: конструктивные идеи. — М.: Медиа Пресс, 2017. — С. 11–22.
5. Харвей Д. Научное объяснение в географии. Общая методология науки и методология географии. — М.: Прогресс, 1974. — 502 с.
6. Сочава В.Б. Экспериментальные исследования геосистем // Методы комплексных исследований геосистем. — Иркутск: Изд-во Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока, 1974. — С. 3–12.
7. Питенко А.А. Нейросетевая аналитическая система для ГИС // Нейронные сети и модели: Труды междунар. науч.-техн. конф. «Нейронные, реляторные и непрерывнологические сети и модели». — Ульяновск: Изд-во Ульян. техн. ун-та, 1998. — Т. 1. — С. 6–8.
8. Питенко А.А. Нейросетевая аналитическая обработка данных в ГИС // Материалы конф. молодых ученых Ин-та вычислит. моделирования СО РАН (апрель 1998 г.). — Красноярск: Изд-во Ин-та вычислит. моделирования СО РАН, 1998. — С. 36–46.

9. **Bishop С.М.** Neural Networks for Pattern Recognition. — Oxford: Oxford University Press, 1995. — 482 с.
10. **Зайонц В.Н., Романов А.А.** К методике составления структурно-геоморфологической карты (на примере Оренбургского Предуралья и Нижнего Поволжья) // Геоморфология. — 1972. — № 2. — С. 47–52.
11. **Твердохлебов В.П.** О раннетриасовом пролювии Приуралья и времени проявления складко- и горообразовательных процессов на Южном Урале // Изв. АН СССР. Сер. Геология. — 1971. — № 4. — С. 42–50.
12. **Гаряинов В.А.** Изучение и прогнозирование экзогенных геологических процессов Оренбургской области. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1981. — 221 с.
13. **Географический** атлас Оренбургской области / Ред. А.А. Чибилёва. — М.: ДИК, 1999. — 96 с.
14. **Программа** обработки данных дистанционного зондирования Земли. Модуль тематической интерпретации. — М.: ИТЦ «СКАНЭКС», 2017. — 248 с.
15. **Савельев А.А., Ермолаев О.П., Мухарамова С.С., Мальцев К.А.** Подходы к районированию рельефа на основе его морфометрических показателей с использованием искусственных нейронных сетей // Доклады XII съезда РГО. Геоэкология и природопользование. — СПб.: Изд-во РГО, 2005. — Т. 4. — С. 348–356.
16. **Назимова Д.И., Ноженкова Л.Ф., Погребная Н.А.** Применение технологий нейросетей для классификации и прогноза изменений зональных условий ландшафтов по признакам климата // География и природ. ресурсы. — 1999. — № 2. — С. 117–122.
17. **Ермолаев О.П., Селиванов Р.Н.** Автоматизированное ландшафтно-экологическое картографирование городских территорий с использованием нейронных сетей (на примере г. Казани) // Уч. зап. Казан. ун-та. — 2010. — Т. 152, кн. 4. — С. 52–67.
18. **Ландшафтно-интерпретационное** картографирование / Отв. ред. А.К. Черкашина. — Новосибирск: Наука, 2005. — 424 с.
19. **Kohonen Т.** The self-organizing map // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. — 1990. — Vol. 78. — P. 1464–1480.
20. **Sammon J.W.** A nonlinear mapping for data structure analysis // IEEE Transactions on Computers. — 1969. — Vol. C. 18, issue 5. — P. 401–409.

Поступила в редакцию 16.10.2017

После доработки 13.08.2018

Принята к публикации 25.12.2019