

Картографическое моделирование урболандшафтов степной зоны России с использованием нейронных сетей

© 2021. С. А. Дубровская, к. г. н., н. с., Р. В. Ряхов, м. н. с.,
Институт степи Уральского отделения Российской академии наук,
460000, Россия, г. Оренбург, ул. Пионерская, д. 11,
e-mail: skaverina@bk.ru

На основе методики автоматизированной классификации искусственных нейронных сетей построена урбоэко-ландшафтная картографическая модель г. Волгограда с использованием геоморфометрических данных для выявления пространственно-однородных участков ландшафтных структур урбогеосистемы. Нейросетевой подход и данные эколого-функционального зонирования позволяют провести пространственную дифференциацию урбогеосистем и получить достоверную информацию, которая необходима для улучшения экологической обстановки городского пространства. В результате применения алгоритма обучения Self-organizing map и созданной цифровой модели составлена картографическая схема урболандшафтного районирования, которая является отражением географической среды и процессов развития техногенных воздействий на состояние природно-антропогенного комплекса. В классификацию методом искусственных нейронных сетей, основанную на вертикальной дифференциации, внесена информация, включающая особенности горизонтальных геоморфометрических показателей. Впервые проведена интеграция выделенных генетических типов рельефа с современным функциональным назначением зон исследуемой урбогеосистемы. Аккумулятивный тип рельефа г. Волгограда выделен нейросетевым алгоритмом как единый континуальный полигон, характеризующийся достаточно равномерной ориентацией склонов. Надпойменно-террасовый комплекс представлен Хвалынской абразионной и аккумулятивной террасами, идентифицированный нейронной сетью по морфометрическим показателям. Водораздельный (склоновый) геоэкологический район представлен прибалочными и приводораздельными склонами. Для классификации склонового типа местности применены картосхемы экспозиций по линиям локальных водоразделов.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, цифровая модель рельефа, геоморфометрические показатели, урбогеосистема, природно-антропогенный комплекс.

Cartographic modeling of the Russian steppe-zone urban landscapes with the use of neural networks

© 2021. S. A. Dubrovskaya ORCID: 0000-0002-1361-6942
R. V. Ryakhov ORCID: 0000-0002-4762-3286
Institute of Steppe of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
11, Pionerskaya St., Orenburg, Russia, 460000,
e-mail: skaverina@bk.ru

Based on the method of automated classification of artificial neural networks, an urban-ecological landscape cartographic model of Volgograd was constructed, using geomorphometric data to identify spatially homogeneous sections of the urban-geographic system landscape structures. The neural network approach and data of ecological-functional zoning allow us to carry out the spatial differentiation of urban ecosystems and to obtain reliable information that is necessary to improve the ecological situation of urban space. As a result of the application of the Self-organizing map learning algorithm and the created digital model, a cartographic model of urban landscapes was compiled, which is a reflection of the geographic environment and the processes of development of technogenic impacts on the state of the natural-anthropogenic complex. In the classification by the method of artificial neural networks, based on vertical differentiation, the features of horizontal geomorphometric indicators information is included. For the first time, the integration of selected genetic types of relief with the modern functional purpose of the zones of the studied urban ecosystem was carried out. The accumulative relief type of Volgograd is identified by the neural network algorithm as a single continual polygon, characterized by a fairly uniform orientation of the slopes. The above-terrace complex is represented by the Kvalyinsk abrasive and accumulative terraces, identified by a neural network by morphometric parameters. The water partite geoecological area is presented by gully slopes and near watershed slopes. To classify the slope type of terrain, maps of the exposures along the lines of local watersheds are applied.

Keywords: artificial neural networks, digital relief model, geomorphic indicators, urbogeosystem, natural-anthropogenic complex.

Экосистема человека – среда обитания и производственной деятельности человека – природный и созданный им материальный мир [1]. Город – экосистема, трансформирующая геоморфологическую основу, частью которой является рельеф, передающий другим элементам геосистемы импульсы воздействия экзо- и эндогенных процессов. Деятельность человека как фактор морфогенеза многогранна: она изменяет интенсивность естественного рельефообразования, непосредственно или опосредовано определяет все последующие изменения природной экосистемы в зависимости от характера, типа и интенсивности воздействия. Вклад характера местности в те или иные процессы требует его количественной характеристики, поэтому одним из самых эффективных методов является морфометрический анализ [2]. Трансформация рельефа на городской территории это не только и не столько изменения поля высот, морфометрических и морфологических характеристик, это создание новых ландшафтно-геоморфологических условий, новой антропогенно-геоморфологической системы со свойственными ей особенностями функционирования [3].

Применение методов автоматизированной классификации на основе математических алгоритмов позволяет упорядочить многообразие объектов и динамических проявлений в географической среде. Математическое моделирование антропогенных явлений используется для мониторинга состояния окружающей среды (ОС), анализа и прогнозирования процессов, поиска оптимальных решений в обычных условиях и при экологических рисках [4, 5]. Существуют математические методы, осуществляющие классификацию данных, например, алгоритм К-средних или традиционные алгоритмы построения дендрограмм. В отличие от данных способов, искусственные нейронные сети (ИНС) [6, 7] обладают набором своих преимуществ – позволяют разбить всё ландшафтное пространство на категории, которые имеют как геоморфометрические показатели, так и картографические характеристики, соответствующие пространственным объектам. Совместный анализ главной природной составляющей – геоморфологической основы территории и современных элементов урбанизации в виде функциональных зон города, раскрывает широкие возможности для разработки мероприятий по охране ОС на урбанизированных территориях; выполнения проектных работ; планирования в селитебной

зоне рационального освоения пригородной зоны [8]. Интегрирование геоинформационной базы данных о рельефе с современной структурой размещения функциональных зон урбанизированной территории позволит комплексно оценить антропогенную нагрузку на природно-техногенную среду.

Цель исследования – на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) построить пространственную картографическую модель урбосреды, детерминирующую состояние природно-антропогенного комплекса.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выбран г. Волгоград – один из мегаполисов европейской части России, расположенный в степной зоне России и занимающий около 1000 км², на стыке трёх морфоструктур: аккумулятивно-денудационных Приволжской и Ергенинской возвышенностей и Прикаспийской низменности. Для создания геоинформационной базы данных исследуемой территории применяли геоморфометрическую информацию, представленную отдельным векторным слоем. Основываясь на результатах районирования территории г. Казани, представленных в работе [10], использующих показатели вертикальной дифференциации, нами внесены дополнения, включающие особенности горизонтальной дифференциации, позволяющие более детально выявить пространственно-однородные участки ландшафтных структур.

Построение ИНС и первичная генерализация нейросетевых классов проведены в программном комплексе ScanEx IMAGE Processor v.5.0 с применением алгоритма обучения Self-organizing map (SOM). Для передачи степени сходства классов использовали их визуализацию в виде минимального остового дерева и его отображения Сэммона [11], сохраняющего порядковые свойства (упорядочение объектов на плоскости соответствует упорядочению в пространстве их характеристик). Полученные 25 полигонов представляют собой линейно вытянутые объекты, границы которых обусловлены сходимостью морфометрических факторов, определяемых алгоритмом, таких как значения регулярной сетки высот, амплитуда, направление и скорость их изменения относительно узлов ИНС. Для последующего объединения кластеров применялась топографическая основа, построенная по данным ЦМР, при помощи которой камеральными методами (верификация

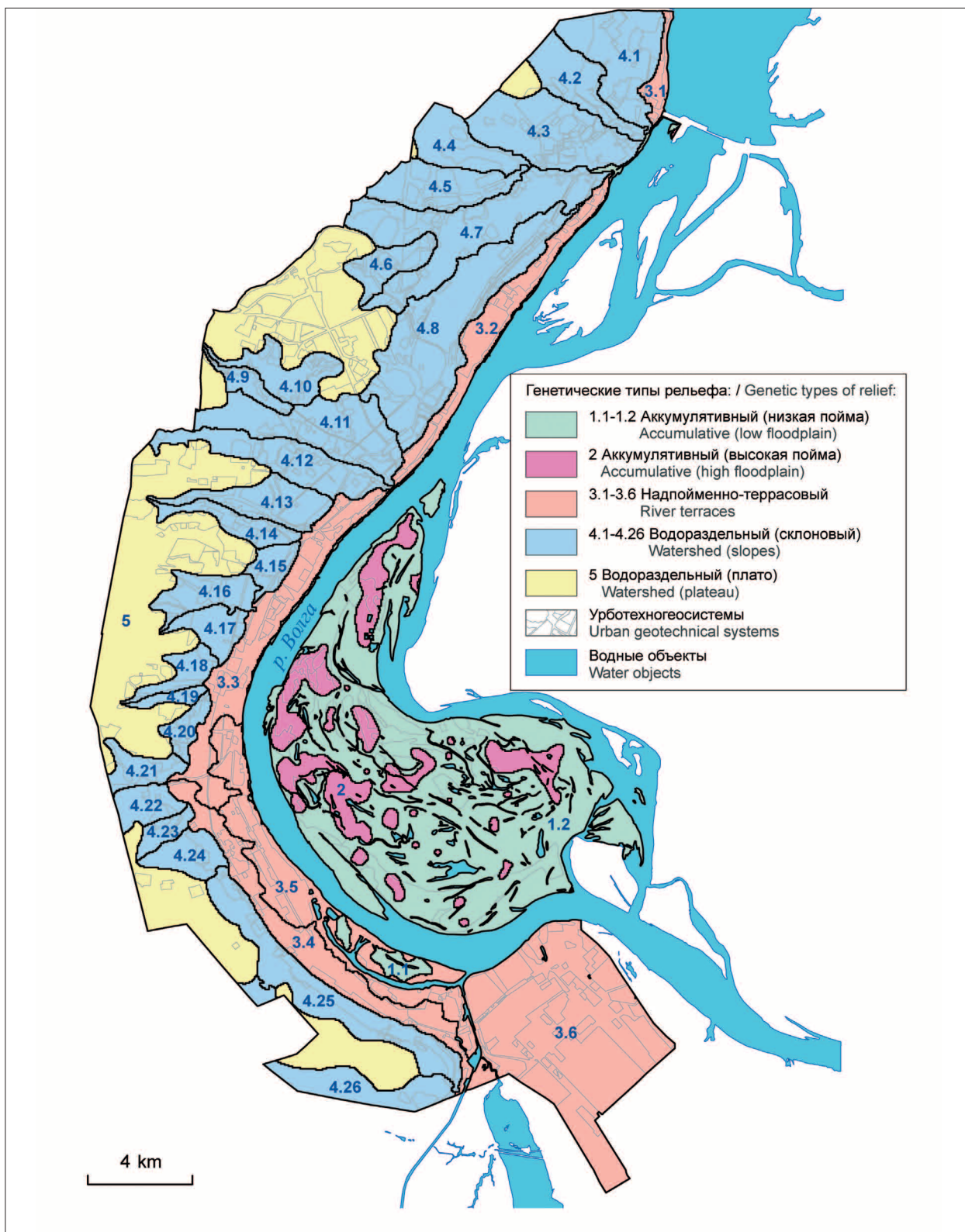


Рис. Интегральная карта генетических типов рельефа и структурно-функционального зонирования г. Волгоград с использованием методов Self-organizing map (условные обозначения в таблице на с. 56)
Fig. Integral map of genetic types of relief and structural-functional zoning of Volgograd using Self-organizing map methods (see Table on P. 56 for symbols)

данных ИНС-алгоритма с картографической базой) были получены 5 полигонов и созданы при помощи программного комплекса QGIS 2.18 картосхемы уклонов и экспозиции, с последующим комплексным геоинформационным анализом. Таким образом, получены 856 пространственных объектов, отражающих фациальную геоморфологическую структуру урбогеосистемы. Крупномасштабные данные не являлись объектом данного исследования и были преобразованы с применением программного комплекса ArcGIS Desktop 10.1 в картосхему геоморфологического районирования более высокого уровня геосистемной организации, включающую 36 локализованных категорий.

Результаты и обсуждение

Рельеф территории в значительной степени влияет на планировочную организацию и размещение функциональных зон города. Согласно данным исследований, в области ландшафтной дифференциации территории г. Волгограда было выделено пять крупных ландшафтных полос: водораздельные поверхности (плакоры, $0-0,5^\circ$), приводораздельные склоны ($0,5-3^\circ$), прибалочные склоны ($3-10^\circ$), Хвалынская абразионно-аккумулятивная терраса (абсолютная отметка $+30-50$ м) и гидрографическая сухоходольная сеть, представленная оврагами и балками волжского склона [12]. Ширина полосы, занятой городской застройкой, варьирует от 3 до 10 км, максимальные отметки высот – 120–152 м (запад города). Глубина расчленения рельефа составляет 130–160 м, поскольку базис эрозии для территории – меженный уровень Волги – находится ниже уровня моря. Это является благоприятным фактором для формирования густой эрозионной сети [13] и оказывает негативное влияние на условия эксплуатации урбанизированной территории, ухудшая проведение инженерно-технических мероприятий в градостроительстве, что напрямую влияет на уровень безопасности и комфорта проживания.

Согласно данным [13], территория урбогеосистемы по степени антропогенной преобразованности геоморфологических районов следующая: Хвалынская абразионно-аккумулятивная терраса – высокая степень преобразованности рельефа (коэффициент преобразования от 14 и более); водораздельное пространство – средняя степень (7–13); склоны – слабая (0–6) [14]. Результаты морфометрических данных с использованием ИНС совмещены со схемой

структурно-функционального зонирования, представлена интегральная картографическая модель урбогеосистемы, характеризующая состояние природно-антропогенного комплекса (рис., см. цв. вкладку).

Правобережная часть поймы р. Волги (рис., 1.1) представляет собой узкую прерывающуюся полосу между урезом воды и гидротехническими сооружениями, что влияет на показатели уклона поверхности, достигающих 10° . По результатам кластеризации этот участок отличается от высокой поймы сильной фрагментарностью. Ландшафтная структура в районе о. Сарпинский (рис., 1.2) представлена чередующимися формами микрорельефа, образованными деятельностью постоянных и временных водотоков: гривы, межгривенные понижения, озёра, ерики. Нейросеть идентифицируется единым континуальным полигоном (низкие показатели уклонов и амплитуды высот). Высокая пойма р. Волги (рис., 2) вычленяется ИНС-алгоритмом локализованными ассиметричными возвышениями.

После генерализации типичных (близких) классов математический алгоритм выделил надпойменные террасы как единый полигональный объект. При помощи картосхем экспозиции и уклонов этот тип рельефа нами классифицирован на шесть ландшафтных категорий, объединённых в два комплекса: Хвалынская абразионная терраса (рис., 3.1–3.4), по морфометрическим показателям достаточно пологая на всём протяжении и Хвалынская аккумулятивная терраса – пологая с высокой степенью неоднородности и преобладанием микрорельефов форм, разделённая Волго-Донским каналом на 2 типа – Бекетовская низина (рис., 3.5) и Заканальная часть (рис., 3.6), которые выделены по разнице высот в рельефе. Территория надпойменно-террасового типа рельефа сильно преобразована промышленными техногеосистемами и локальными рекреационными территориями.

Склоновый тип местности ИНС-алгоритм выделил как единый полигональный объект. В связи с этим дополнительно нами применялись картосхемы экспозиций для разделения по линиям локальных водоразделов. Полигон разделён на 26 категорий (рис., 4.1–4.26), включающих прибалочные и приводораздельные склоны. Дифференциация осуществлялась на основе следующих геоморфометрических показателей: резкое изменение экспозиционной направленности, степень уклона поверхности и наличие эрозионных врезов. Овражно-балочная сеть характеризуется уве-

Таблица / Table

Тематическая классификация рельефа по абсолютной высоте, уклонам и экспозиции урбогеосистемы / Thematic classification of the relief in terms of absolute altitude, slopes and exposure of the urban geotechnical system

Категории, классы Categories, classes	Типы рельефа, характеристики геоэкологических районов Types of relief, characteristics of geo-ecological areas	Средние уклоны Average slopes	Экспозиции Expositions	Средние высоты, м Average heights, m
1.1–1.2	Аккумулятивный (долина реки Волга). Низкая пойма р. Волга Accumulative (valley of the Volga River). The low floodplain of the Volga	0–3	СВ, ЮВ NE, SE	4,9–6,7
2	Аккумулятивный (долина реки Волга). Высокая пойма р. Волга Accumulative (valley of the Volga River). The high floodplain of the Volga	< 1	В Е	7,1
3.1–3.6	Надпойменно-террасовый. Хвалынский абразионные и аккумулятивные террасы Khvalynskiy abrasion and accumulative river terraces	1–3	В, СВ, Ю, ЮЗ E, NE, S, SW	8,1–28,5
4.1–4.26	Водораздельный (Приволжская возвышенность). Прибалочные и приводораздельные склоны Watershed (the Volga Upland). Near-ravines and near-watershed slopes	2–5	С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ N, NE, E, SE, S, SW	56,8–84,9
5	Водораздельное плато Приволжской возвышенности Watershed plateau of the Volga Upland	1	Ю S	125,2

личением средней высоты и крутизны склонов в южном направлении. Размеры приводораздельных склонов обусловлены факторами расположения вершины (плато Приволжской возвышенности) и базиса эрозии (р. Волга). Амплитуда колебаний средней высоты восточных склонов не превышает 10 м. Изменение степени уклона коррелирует с прибалочными склонами. Отдельно можно выделить пологий и более высокий склон южной экспозиции, ориентированный в сторону Сарпинской низменности. Водораздельное плато Приволжской возвышенности (рис., 5) выделяется ИНС-алгоритмом единым континуальным (непрерывным) объектом, состоящим из нескольких полигонов, и отличается низкими показателями крутизны склона южной экспозиции. Выровненная поверхность этого геоэкологического района обеспечивает благоприятные условия для размещения объектов промышленности и зон специального назначения (земли обороны и безопасности, ритуальные комплексы).

Заключение

Применение ИНС-алгоритмов и методов геоинформационного анализа простран-

ственных данных позволило провести оценку рельефа в качестве основы функционального зонирования урбогеосистемы г. Волгограда. Комплексное исследование городского ландшафта, учитывающее специализацию планировочной структуры территории и её морфометрические особенности, отражает закономерности развития техногенных процессов и особенности современного состояния городского пространства. Полученная урболандшафтная картографическая модель может служить основой для ландшафтно-экологического районирования урбанизированной территории, позволяет получить целостную картину процессов в ландшафте города с учётом прямых и обратных связей между деятельностью человека и природной составляющей, отступить от схем эколого-функционального зонирования (функциональной раздробленности), которая является основой генеральных планов городов.

В целом, для обеспечения человека в городской среде благоприятными и комфортными условиями, которые формируются из экологических показателей, сложившихся природно-климатических особенностей и техногенных факторов, необходимо форми-

ровать устойчивое развитие качества жизни. Геологическое и геоморфологическое строение урбанизированной территории необходимо учитывать не только на этапе создания строительных конструкций, но и в процессе градостроительного использования. На территории г. Волгограда в результате антропогенного воздействия произошли изменения природной среды – морфометрические и морфологические характеристики рельефа, которые сформировали новые ландшафтно-геоморфологические условия, приводящие к развитию опасных геологических процессов, отрицательно влияющие на градостроительную безопасность и ухудшающие проведение инженерно-технических мероприятий. К таким активно проявляющимся экзогенным процессам на территории г. Волгограда относятся подтопление, набухание и усадка глин, морозное пучение, просадочность супесей и суглинков, заболачивание, сдвигание грунтов, нарушение выхода грунтовых вод. На ландшафтно-экологическую обстановку г. Волгограда оказывает влияние крупный гидрологический объект – р. Волга. Строительство Волжской ГЭС привело к изменениям гидрологического режима речной системы. Последствиями такого антропогенного воздействия стали процессы обрушения береговой линии, оползнеобразование и подтопление, образование множества оврагов. Таким образом, инженерно-хозяйственная деятельность человека – строительство жилых и промышленных зданий, ликвидация оврагов, открытая добыча минерального сырья, железнодорожные выемки, дамбы и прочее, является мощным фактором, преобразующим рельеф города.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института степи ИС УрО РАН № АААА-А21-121011190016-1.

References

1. Relief of human environment (ecological geomorphology) / Eds. E.A. Likhacheva, D.A. Timofeev. Moskva: Media-PRESS, 2002. 640 p. (in Russian).
2. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. V. 107. P. 1–32. doi: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7

3. Trubina L.K., Avrunev E.I., Nikolaeva O.N., Kalenitsky A.I., Antipov I.T. Approaches to geoinformation modelling of urban territory to integrate the environmental component into the system of state real property cadaster // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. 2018. V. 329. No. 9. P. 43–51 (in Russian). doi: 10.18799/24131830/2018/9/2087
4. Zipperer W.C., Wu J., Pouyat R.V., Pickett S.T.A. The application of ecological principles to urban and urbanizing landscapes // Ecological Applications. 2000. V. 10. No. 3. P. 685–688. doi: 10.2307/2641038
5. Kohonen T. The self-organizing map // Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1990. V. 78. P. 1464–1480. doi: 10.1109/5.58325
6. Adamovich T.A., Ashikhmina T.Ya. Aerospace methods in the system of geo ecological monitoring of natural and anthropogenic areas // Theoretical and Applied Ecology. 2017. No. 3. P. 15–24 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2017-3-015-024
7. Bishop C.M. Neural networks for pattern recognition. Oxford: Oxford University Press, 1995. 482 p.
8. Anopin V.N., Rulev A.S., Berezovikova O.Yu. The use of GIS technology in mapping urban landscape of Volgograd // Vestnik Volg GASU. Seriya: Stroitelstvo i arkhitektura. 2012. No. 26 (45). P. 200–207 (in Russian).
9. EarthExplorer: Spatial Information Database of the USGS [Internet resource] <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Accessed: 11.09.2018).
10. Yermolaev O.P., Selivanov R.N. The use of automated geomorphological clustering for purposes of urban planning (the example of the city of Kazan) // World Applied Sciences Journal. 2014. V. 30. No. 11. P. 1648–1655. doi: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.11.14229
11. Sammon J.W. A nonlinear mapping for data structure analysis // IEEE Transactions on Computers. 1969. V. C-18. No. 5. P. 401–409. doi: 10.1109/T-C.1969.222678
12. Kulik K.N., Kosheleva O.Yu., Koshelev A.V. Landscape differentiation of the territory of Volgograd // Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie. 2014. No. 4 (36). P. 27–32 (in Russian).
13. Brylev V.A., Kryukov K.K. The experience of geomorphological reconstruction of the liquidated erosion network of the basins of small rivers of the Volgograd agglomeration // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. 2013. No. 4. P. 62–65 (in Russian).
14. Melikhova E.V. Analysis of the anthropogenic load on the relief within the city of Volgograd // Theoretical problems of modern geomorphology. Theory and practice of studying geomorphological systems: Materialy XXXI Plenuma Geomorfologicheskoy Komissii RAN. Astrakhan: Tekhnograd, 2011. P. 305–310 (in Russian).