

УДК 712(075.8)

**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ  
ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ  
ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ  
(на примере г. Казани)**

*О.П. Ермолаев, Р.Н. Селиванов*

**Аннотация**

Эффективность управления крупными городами во многом определяется наличием адекватной картографической модели, системно учитывающей пространственную неоднородность территории. Методика урболодшафтного картографирования разработана слабо. Одной из причин является привлечение большого массива данных, включающих как сильно трансформированные геокомпоненты природно-территориальных комплексов, так и социально-экономическую среду. Для этого необходимо применение современных методов автоматизированного районирования, основанных на информационных технологиях. В работе рассматривается методика урбогеосистемного картографирования территории крупного города (на примере г. Казани) с использованием искусственных нейронных сетей.

**Ключевые слова:** ландшафтное планирование, ландшафтное районирование, нейронные сети, ГИС-технологии, картографирование городов, городские системы.

---

**Введение**

Город представляет собой очень сложную систему, характеризующуюся концентрацией компактно проживающего населения. Подобное сосредоточение людей предопределяет и концентрацию всей совокупности хозяйственных и социальных отношений, что, несомненно, приводит к созданию сложной, порой противоречивой системы. Конфликт интересов в этой системе генерирует большой и разнообразный клубок проблем, касающийся самых различных аспектов. Одним из таких аспектов является сфера эффективного планирования и охраны окружающей среды. Огромное число экологических проблем основывается на взаимоотношениях города с окружающим ландшафтом [1]. В условиях интенсивного роста и развития городских агломераций особенно остро ставится вопрос об эффективном использовании ограниченных ресурсов городской территории.

Территориальное планирование (то есть оптимизация природопользования на конкретной территории) и принятие управленческих решений в условиях городских территорий с точки зрения учета и правильной организации географического пространства были бы более простой процедурой в том случае, если бы город располагался на ровном как «стол» и однородном по генезису участке суши. В таком случае вся совокупность условий для принятия решений определялась

бы особенностью взаимного положения отдельных объектов внутри городской системы: жилой, промышленной застройки, объектов инфраструктуры, зеленых насаждений и т. д. По сути, необходимо было бы учитывать только функциональное зонирование города. В таком случае было бы совершенно не важно, где находится тот или иной элемент городской системы, но было бы существенно, как он располагается относительно других объектов. В реальности такого «идеального урбогеопространства» безусловно нет даже в малых городах. Ландшафтная структура территории накладывает серьезные ограничения на принятие тех или иных решений. К сожалению, очень многие управленческие решения в городах принимаются без учета природных характеристик конкретной территории или учитываются только некие отдельные факторы. Многие виды деятельности просто невозможны на определенных участках, а на других возможны, но неэффективны. И это касается не только вопросов охраны окружающей среды, рационального использования природных благ, но и всей совокупности деятельности человека в городах. Самым массовым следствием пренебрежения учета системных свойств городских агломераций является неэффективность осуществляемой деятельности. Последствие подобной «неэффективности» особенно ярко проявляются в случае масштабных изменений ландшафтной структуры урбосистем. В качестве примера можно привести проектирование объектов и создание соответствующей инфраструктуры для Всемирной Универсиады 2013 г. в Казани. Заложенная в проектах строительства спортивных объектов трансформация ряда природных систем (р. Казанка, оз. Кабан, прибрежные территории и др.) без достаточной научной и социальной проработке воздействия на окружающую среду на стадии проектирования привело к острым дискуссиям. В результате серьезно пострадала имиджевая составляющая этого крупного и, безусловно, нужного для города и страны проекта международного уровня.

Для принятия квалифицированного управленческого решения в крупном современном городе прежде всего нужна полная и достоверная информация по основным связующим подсистемам, в частности по природным условиям города. Исследования, направленные на системный сбор информации о территории, чаще всего относятся к сфере ландшафтно-экологического картографирования. Ландшафтно-экологический подход к изучению городской территории активно использует методологию системного анализа. В данном случае город рассматривается как сложная, полиструктурная, территориальная, открытая, энергетически субсидируемая (по Ю. Одуму), геохимически аккумулятивная управленческая система – урбогеосистема (по В.З. Макарову).

Попытки выделения в городе ландшафтных единиц различной таксономии с использованием традиционных подходов чаще всего обречены на неудачу в силу полной либо частичной трансформации почвенного покрова, биоценозов, подземных вод и даже наиболее консервативной части ландшафта – состава подстилающих горных пород. В условиях антропогенезированных природно-территориальных комплексов современного города проблематично выделение даже довольно крупных ландшафтных образований (район, подрайон). Возникает вопрос: можно ли вообще называть некие пространственные выделы в пределах урбанизированных территорий (участки застройки) ландшафтами в классическом

их понимании? По всей видимости, в условиях города, где все компоненты ландшафта преобразованы человеком, но сохраняют признаки природно-антропогенных систем, имеющих свои закономерности функционирования в связи с частично или даже полностью отсутствующими отдельными геокомпонентами системы (почвы, растительность, подземные воды и т. д.) с наложенной на них социально-экономической средой, необходимо говорить не о ландшафтах, а *урбогеосистемах* (*urban geosystem*). Именно они являются предметом геоэкологических исследований в пределах городов, выступая в качестве операционно-территориальной единицы.

При «ландшафтном» картографировании городских территорий самым надежным диагностическим признаком, позволяющим провести пространственную дифференциацию геосистем, источником достоверной информации о ландшафтной структуре города является рельеф. Суперпозиция рельефа проявляется в том, что при его пространственной дифференциации возникают местоположения, которые являются формой любого по размерам элементарного ландшафта (включая город), «...представляют совокупность его гравитационной, циркуляционной и инсоляционной экспозиций относительно проходящих через него и связывающих с другими элементарными ландшафтами вещественных и энергетических потоков – перемещений тепла, влаги, минеральных, водных и воздушных масс с их вредными (или полезными) для человека и биоты химическими, радиоактивными и прочими компонентами» [2, с. 32]. Поэтому дифференцируя рельеф территории на отдельные элементарные геоморфологические участки, мы получаем основу для наиболее адекватного определения границ урбогеосистем [3]. Под *урбогеосистемами* мы понимаем комплексные территориальные образования заданной размерности в пределах города, возникающие в результате оверлея ландшафтных выделов, полученных на основе дифференциации рельефа по набору его морфометрических признаков, с участками функционального зонирования города.

Развитие вычислительной техники и информационных технологий позволяет использовать современные геоинформационные системы для эффективного моделирования окружающего мира. Количество информации при анализе ландшафтных систем столь велико, что без использования ГИС-технологий обработать и проанализировать ее почти нереально.

Использование ГИС-технологий в ландшафтном картографировании привело к существенным успехам в этой области, в частности в вопросах классификации ландшафтных выделов. Одним из наиболее перспективных подходов является метод искусственных нейронных сетей (ИНС), который позволяет проводить объективное зонирование даже без учета детальной информации о процессах в этой системе. Разновидностью ИНС являются «самоорганизующиеся карты Кохонена». Нейронные сети данного типа часто применяются для решения самых различных задач. Метод хорошо зарекомендовал себя в биохимических исследованиях, вопросах управления и особенно ярко при решении широкого спектра финансовых задач. На наш взгляд, нет никаких препятствий по применению ИНС для решения сложных задач частного и комплексного районирования (классификации) территории в самых разных областях, использующих в качестве объекта районирования географическое пространство.

ИНС могут рассматриваться как мощный математический инструмент, позволяющий строить надежные непараметрические модели сложных природных систем [4]. Однако элементы «черного ящика», которые присущи этому методу классификации, требуют проверки адекватности модели. Самым надежным способом проверки правильности классификации, безусловно, являются полевые исследования городской территории, позволяющие установить объективность обособления того или иного выдела (класса).

Таким образом, основная цель нашего исследования заключалась в адаптации метода ИНС (самоорганизующиеся карты Кохонена) для автоматизированного урбогеосистемного районирования городской территории (на примере г. Казани). Основные задачи исследования включали: 1) анализ зарубежного и отечественного опыта картографирования территории города; 2) создание цифровой модели рельефа г. Казани; 3) разработку методики урбогеосистемного районирования городской территории средствами ИНС на основе классификации рельефа по его морфометрическим признакам; 4) создание карты урбогеосистем; 5) верификацию полученных результатов.

## **1. Ландшафтное картографирование городских территорий**

**1.1. Зарубежный опыт.** В зарубежных исследованиях под термином «городской ландшафт» подразумевается природно-антропогенная система, которая содержит в себе свойства природных (рельеф, растительность, почвы, полезные ископаемые и др.) и культурных составляющих (плотность населения, структура жилой застройки, производственные процессы, коммуникации) [5].

Как указывают некоторые зарубежные исследователи, только в последнее время развивается экосистемный и ландшафтный подходы в управлении урбанизированными территориями [6]. Причем основные усилия направляются на развитие ландшафтного планирования для целей эффективного управления крупными природно-антропогенными образованиями [7]. Налицо желание зарубежных исследователей развивать ландшафтные и экосистемные подходы именно в свете решения конкретных проблем крупных городов. Пожалуй, самой популярной темой в ландшафтном планировании урбанизированных территорий является тема мониторинга состояния как природных систем в целом, так и отдельных их компонентов [8]. Много внимания уделяется вопросам сохранения биологического и ландшафтного разнообразия, определению ценностных предпочтений населения в вопросах сохранения качества окружающей среды. Необходимо отметить, что зарубежные коллеги так же, как и наши исследователи, всячески подчеркивают значимость системного решения поставленных задач в рамках развития городов.

Важной тенденцией по расширению сферы применения ландшафтных подходов является развитие работ по экономической оценке эффективности тех или иных планировочных задач. Так, в работе, посвященной зависимости стоимости недвижимости от близости к элементам «зеленого каркаса» города, наглядно показано, что отсутствие зеленых зон приводит к существенному падению стоимости недвижимости. [9]. Похожие попытки экономической оценки урбанизированных ландшафтов можно найти и у других исследователей [10].

Пожалуй, наиболее интересное направление работ (в аспекте наших исследований), связанных с урбанизированными территориями, – это определение границ природно-территориальных комплексов. При этом подчеркивается необходимость выделения для целей городского планирования неких природно-антропогенных образований, границы которых не должны определяться лишь системой границ административного деления города. Как показал социологический опрос [11] специалистов в области ландшафтного планирования, который проводился в штате Вашингтон, приблизительно 42% респондентов указывают на существенную важность выделения границ природных систем. Например, акцентируется внимание на том, что городские системы часто располагаются на территории и являются составными частями таких природных систем, как водосборные бассейны, пойменные участки крупных водотоков. Здесь же отмечается, что зачастую задача по точному выделению границ тех или иных природных систем в рамках крупных агломераций не имеет универсального алгоритма решения и часто так и остается теоретической концепцией с серьезными ограничениями на практическую реализацию. Органы власти привыкли работать исключительно в рамках собственных административных границ. Сбор налогов, финансирование, реализация разнообразных проектов и многое другое осуществляются внутри конкретных территориальных границ. Понять, почему необходимо отказаться от наработанной схемы управления ради интересов одного из направлений планирования, зачастую бывает очень сложно. Многие специалисты с сожалением отмечают, что на настоящий момент нет достаточного количества положительных примеров реального применения ландшафтного подхода, который бы строился на адекватном ландшафтном зонировании городской территории.

Анализ зарубежного опыта ландшафтного картографирования урбанизированных территорий свидетельствует о важности такого подхода для решения многообразных задач городского планирования и в то же время о нерешенности многих методологических и методических задач по определению ландшафтной структуры городских территорий.

**1.2. Отечественный опыт.** По предложению Л.С. Берга [12], участок земной коры, в пределах которого сохраняется относительная однородность геолого-геоморфологических условий, является основной территориальной единицей природной географии и именуется географическим ландшафтом. Подобная организация геосистем – продукт длительной эволюции Земли как планеты. Н.А. Солнцев [13] выдвинул положение о так называемом «генетическом ряде» компонентов, образующих ландшафт. Термин «геосистема» был введен в 1963 г. В.Б. Сочавой [14] как синоним «природного комплекса». Под ландшафтом мы понимаем естественные единицы геопространства, на которые распадается природа любой территории; это генетически единая геосистема, однородная по зональным и а зональным признакам, включающая в себя специфический набор сопряженных локальных геосистем.

При исследовании городов применяются положения антропогенного ландшафтоведения, концепции геосистем, ландшафтно-архитектурных систем. Так, в работах И.И. Мамай [15], город рассматривается как сложная природно-

антропогенная система с присущей ей структурно-функциональной организацией и пространственной дифференциацией функционирования.

И.С. Круглов представляет город как участок природного ландшафта, преобразованный процессом урбанизации. Им были проведено крупномасштабное картографирование коренных вариантов природно-территориальных комплексов (ПТК) и современных антропогенно-природных территориальных комплексов, а также изучение степени и характера антропогенной трансформированности ПТК [16]. Степень интегральной трансформированности ПТК определяется И.С. Кругловым на основе концепции неравнозначности его компонентов: менее измененными считаются те участки, где преобразования затронули лишь биотические компоненты, а более измененными – где трансформирована литогенная основа. Отсюда более устойчивыми считаются те из природных комплексов, которые при равных нагрузках испытывают менее глубокие структурные изменения.

Согласно представлениям Милькова, в природном ландшафте геокомпоненты по своему структуроформирующему (системообразующему) значению располагаются в такой последовательности: геологическая основа, рельеф, гидросфера, атмосфера, почвы, растительность и животный мир [17]. Отсюда, по мнению Г.П. Миллера, возникает наибольшая «сила» и определяющее влияние геолого-геоморфологической основы на менее устойчивые компоненты природного комплекса: тепло и влага перераспределяются под влиянием свойств литогенной основы, в особенности рельефа, а почвы, растительность и животные «отбираются» в зависимости от местообитаний. Отсюда и устойчивость литогенной основы по отношению к внешним воздействиям, ее инертность [18].

По мнению И.С. Круглова [16], сохранившиеся компоненты и элементы ПТК формируют природный каркас урболандшафта, а элементы городской среды, созданные человеком, – антропогенный покров. А.Ю. Дмитрук в составе городского ландшафта выделяет природные, антропогенные и техногенные компоненты [19], при этом в ходе ландшафтного анализа урбанизированных территорий принимается во внимание два вида компонентов: морфолитогенный и архитектурный.

Позже появляются представления о значительной роли техногенной деятельности в формировании городского ландшафта. По мнению Ф.В. Тарасова, техногенные комплексы в значительной степени определяют физиономию городского ландшафта и его современную структуру, а природные – на уровне фаций, урочищ, типов местности – в условиях города коренным образом трансформируются [20].

Представления о пространственно-временной обусловленности главенствующей ландшафтоформирующей роли природных или техногенных факторов отражают действительную картину развития ландшафта города [17].

Ведущим фактором в обособлении ПТК регионального уровня являются эндогенные процессы, которые формируют морфоструктурный каркас современных ландшафтов [16]. Ландшафтоформирующие возможности природных компонентов и процессов, безусловно, продолжают действовать при возникновении и развитии на территории городской системы, но уже в значительно меньшей степени. В целом именно сочетание неоднородности природных компонентов

и многочисленных видов функционального использования городской территории дает разные комбинации признаков (виды урболандшафтов), особенно если многофункциональный район расположен на стыке нескольких природных комплексов. В качестве главного природного компонента, как правило, выступает рельеф. Так, на карте коренных ландшафтов и схеме ландшафтных районов г. Москвы ведущим признаком являются формы и генетические типы рельефа [21]. Хотя итоговая карта ландшафтного зонирования больше напоминает схему функциональных зон города (застроенные, незастроенные, неурбанизированные).

При изучении городов часто используют термин «урбогеосистема». Это понятие рассматривается в трудах В.В. Винокуровой, А.Э. Гутнова, Ю.С. Попкова, И.К. Панина, Б.Л. Шмульяна, Г.М. Лаппо, А.М. Выходцева и др. Но далеко не всегда урбогеосистема выступает как единица картирования. Самих же работ по комплексному картографированию городских территорий с выделением ландшафтных единиц или урбогеосистем проведено крайне мало.

Пожалуй, наиболее системные, комплексные исследования по ландшафтному картографированию городской территории проведены В.З. Макаровым. Им также рассматривается понятие урбогеосистемы, которая включает три подсистемных блока: природный, инженерно-технический и демопопуляционный [1]. Дифференциация городской территории В.З. Макаровым проводится на ландшафтные районы, подрайоны, местности и урболандшафтные участки. При этом особо подчеркивается роль рельефа и литологии в пространственной дифференциации территории города по природным компонентам. Исследованиями были вскрыты взаимосвязи и системообразующие отношения между пластикой рельефа, типом застройки, транспортными коридорами и геохимическими аномалиями в снеге и почвогрунтах [22].

Заслуживает также внимания и специфическая единица картографирования урбанизированных территорий – ландшафтно-геоэкологическая система, – предложенная Э.П. Романовой и Т.И. Кондратьевой [23]. Под ней авторы понимают интегральную территориальную единицу геопространства, преобразованную конкретным видом хозяйственного и социального воздействия. В рамках этой единицы происходит развитие природно-антропогенных процессов как ответной реакции природных структур на испытываемый стресс.

## **2. Методика применения ИНС для целей урболандшафтного картографирования городской территории**

Одно из многочисленных направлений использования ИНС является решение сложных задач классификации (районирования) пространственно распределенных данных, обобщению этих данных и выделению участков (топологических районов) с условно однородными значениями. Непараметрические методы на основе нейронных сетей Кохонена [24] позволяют аппроксимировать непрерывное изменение свойств объекта. Поскольку топологические отношения заданы положением на ординационной плоскости, то процесс формирования отображения данных определяется как алгоритм «самоорганизующихся карт» (Self Organizing Map – SOM), а сам результат рассматривается как «карта» свойств или характеристик. Такие «карты», относящиеся к топографическим отображениям, могут быть эффективно использованы для распознавания структуры

данных, а также как средство их двумерной визуализации. Традиционно SOM рассматривается как эмпирический алгоритм. Выводы о структуре данных делаются на основе визуального анализа полученной карты. Основным преимуществом модели SOM является ее способность к генерализации, то есть правильному отображению на ординационную плоскость новых данных [25].

Математический анализ SOM является трудным в силу эвристических основ алгоритма. Таким образом, нейронные сети Кохонена и их обобщения являются в настоящее время практически единственным средством, позволяющим (в силу адаптивности и самоорганизации нейронной сети, не требующей предварительной калибровки данных, устойчивости к шумам и искажениям) получить ординацию и выявить структуру объектов с учетом всей совокупности данных [25].

Есть ряд работ, где с успехом использованы ИНС для целей ландшафтного, эрозионного и геоморфологического районирования территории Среднего Поволжья и Республики Татарстан [26–28]. Среди подходов по автоматизированному районированию ПТК можно выделить работы, где в качестве критерия пространственной дифференциации классов определяется мера близости между векторами-объектами с использованием так называемых потенциальных функций [29]. В этой же работе подчеркивается возможность и необходимость применения результатов автоматической классификации морфометрических показателей для выделения границ ПТК.

Применение ИНС для районирования геопространства в качестве важнейшего этапа предполагает верификацию полученных результатов. Иными словами, оценку того, насколько приведенная модель классификации пространства адекватна и отображает наличие реальных природных, природно-антропогенных систем, а также решение вопроса «...может ли методика построения ландшафтных планов по оцифрованному рельефу методом морфодинамического анализа быть автоматизирована и “тиражирована” на уровень широкого использования?» [30, с. 2].

Поэтому важнейшим этапом наших исследований были полевые работы по проверке и сопоставлению данных, полученных с помощью ИНС и традиционного ландшафтного картографирования. Отметим также, что ранее работ по автоматизированному урбогеосистемному (ландшафтному) районированию города с использованием ИНС не проводилось.

Для картографирования урбогеосистем г. Казани средствами ИНС нами была сформулирована следующая логическая цепочка действий. На первом этапе требовалось определить уровень генерализации для обеспечения принципа сомасштабности исследований, затем построить цифровую модель рельефа города детального уровня генерализации (1 м). Далее необходимо выбрать морфометрические характеристики рельефа и рассчитать их по регулярной растровой сетке. Параметры приводятся в единую систему соизмеримых показателей. Следующий шаг состоит в классификации рельефа с использованием искусственных нейронных сетей. И наконец следует процесс идентификации полученных классов и интерпретации результатов автоматизированного районирования. Здесь же происходит процедура укрупнения результатов классификации. Полученные классы интерпретируются как суррогатные природно-территориальные выделы, представленные вероятностями наличия определенного набора морфометрических



признаков рельефа, которые могут выступать как базовые территориальные единицы определенного таксономического ранга (местоположения) урбогеосистем (ландшафтов). Следующим важным этапом является проверка адекватности выделения тех или иных классов на территории изучаемого города. Следует отметить, что именно полевые исследования позволяют получить наиболее полное представление о потенциале и эффективности применения автоматизированных методов пространственной дифференциации города с помощью ИНС. По результатам этих работ вносятся необходимые коррективы в схему природного районирования города. Полученная в результате карта совмещается с картой функционального зонирования города для выделения урбогеосистем различного ранга.

### 3. Результаты

**3.1. Геоморфометрическое районирование территории г. Казани с использованием методов SOM.** Картографической основой для выполнения работы являлась крупномасштабная цифровая топографическая карта г. Казани (сечение рельефа 1 м). С помощью программного продукта Surfer 7.0 была создана цифровая модель рельефа с шагом регулярной растровой сетки 10 м. Используя программные продукты Surfer 7.0 и ESRI ArcGIS 9.1, определялись значения морфометрических характеристик рельефа (абсолютная высота, уклон, экспозиция, профильная и плановая кривизна), являющегося базовой основой для ландшафтного картографирования города. Были построены соответствующие морфометрические карты рельефа города.

Результаты расчетов морфометрических величин преобразуются в матрицу данных. Строки в ней соответствуют минимальной территориальной единице (размер сетки), а столбцы – параметрам, количественно ее характеризующим. Здесь важно учитывать необходимость приведения различных характеристик к единой стандартной шкале и необходимость определения степени значимости конкретного показателя. Далее проводилась ландшафтное районирование (классификация) средствами ИНС. При ландшафтном районировании с использованием ИНС использованы программные и методические разработки А.А. Савельева [25]. Это позволило провести для нейронной сети Кохонена классификацию выделов, а также их ординацию в пространстве признаков. Программные продукты используют алгоритмы обучения нейронной сети Кохонена без использования учителя, при этом происходит перераспределение весовых коэффициентов для каждой конкретной ОТЕ. После нескольких итераций процесса «обучения» нейронной сети происходит постепенное обособление групп ОТЕ со схожим набором морфометрических показателей. В результате все множество точек пространства обособляется и группируется в пространстве признаков.

Использование данного программного обеспечения для классификационной сетки размерностью  $9 \times 9$  позволило получить на первом этапе работы 81 тематический класс, соответствующий по ландшафтной таксономии урочищам. Безусловно, для последующего урбогеосистемного районирования такая дробность является излишней, поэтому на основании родства классов проведено их укрупнение и интерпретация полученных результатов. На рис. 1 и 2 можно увидеть результат укрупнения классов для отображения Сэммона.

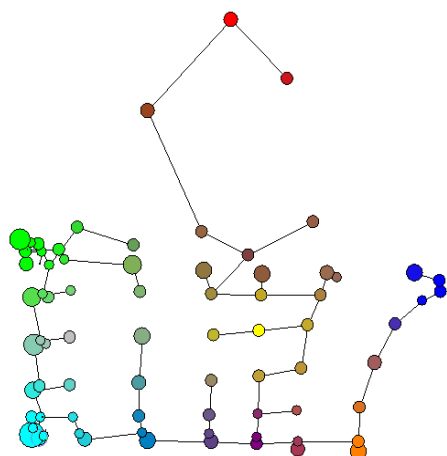


Рис. 1. Результаты ординации в отображении Сэммона

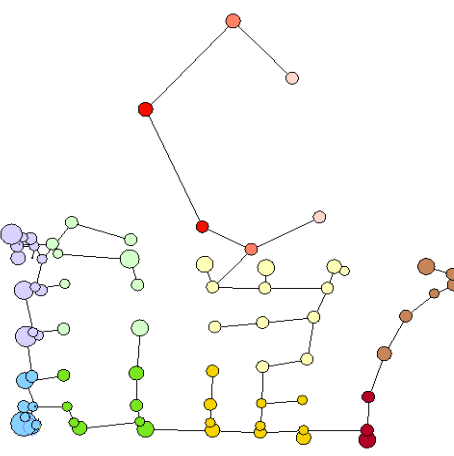
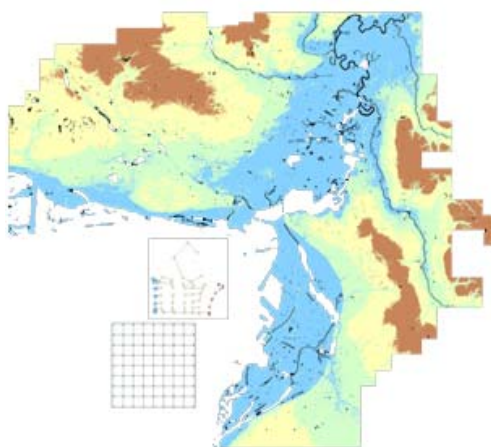
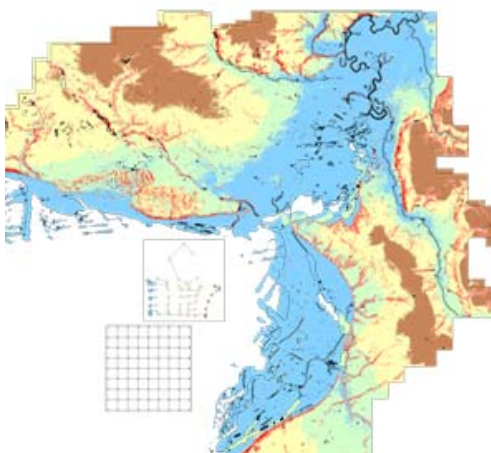


Рис. 2. Отображение Сэммона для тематически определенных укрупненных классов



а)



б)

Рис. 3. Результаты тематической классификация рельефа г. Казани по абсолютной высоте (а) и по уклонам (б)

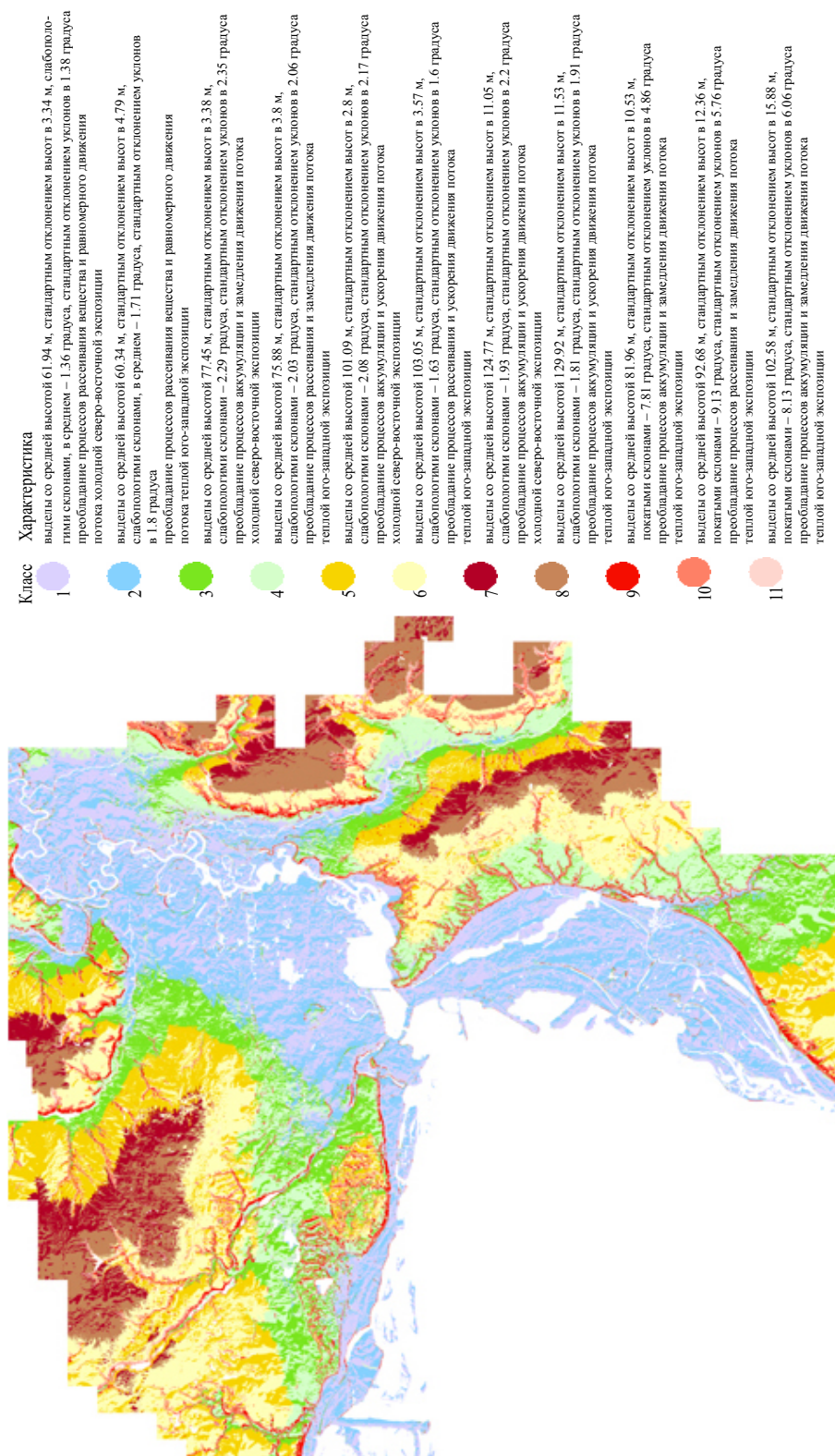


Рис. 4. Карта урбандишфтного районирования г. Казани с использованием методов SOM. Исходный M 1:10 000

Конечным продуктом стала ландшафтная карта, отражающая в первую очередь особенности геоморфологического строения города. Сопоставление с существующими геоморфологическими картами г. Казани показывает хорошую сходимость границ основных генетических типов рельефа. Именно они создают основу укрупненных районов города, которые в дальнейшем идентифицируются как урбогеосистемы. В первую очередь великолепно отражается террасовый комплекс (рис. 3, *а*), хотя на нашей карте произошло объединение пойменной и первой надпойменной террасы. Это обусловлено переработкой рельефа и, как следствие, размытостью границ между ними. Поэтому для разделения этих морфогенетических типов рельефа необходимо привлечение данных о составе и строении отложений. Благодаря обособлению территорий с разными уклонами (рис. 3, *б*) хорошо отображены уступы террас и овражно-балочная сеть. Хорошо идентифицируются области преобладающей аккумуляции и денудации, транзитные и транзитно-аккумулятивные участки склонов за счет классов, где проявляет себя профильная кривизна. Небольшую долю составляют классы с определяющей ролью плановой кривизны. Роль экспозиции в дифференциации территории проявляется нечетко. Это связано с недостаточной калибровкой некоторых входных параметров программы и ее малой ролью в создании основного каркаса рельефа г. Казани (рис. 4). Однако при укрупнении масштаба (уровень урочищ) или в условиях расчлененного возвышенного и горного рельефа значение экспозиции будет возрастать в связи с большими контрастами в радиационном и тепловом балансах, существующими на различно экспонированных участках склонов.

### 3.2. Верификация результатов автоматизированного районирования.

Самостоятельный этап исследований – полевая проверка произведенного зонирования территории средствами ИНС. Как мы уже видели, ИНС произвела сложный процесс классификации морфометрических показателей рельефа с обособлением участков, где их значения условно единообразны. Еще раз подчеркнем гипотетичность полученных промежуточных результатов. Отражены ли все характерные особенности пластики рельефа, насколько справедливо подобное выделение классов, не присутствуют ли на полученной карте некие псевдозоны, по своей сути являющиеся артефактами, но которые ИНС выделяет как промежуточные классы? Перечень вопросов легко можно продолжить. Одним словом, модель требует проверки, как и любая другая, базирующаяся на определенных теоретических умозаключениях. Присущий же методу самоорганизующихся карт эффект «черного ящика» делает подобную проверку совершенно необходимой. В данном случае формой такой проверки являются полевые исследования. Для этого необходима полевая идентификация каждого класса урбандо-ландшафта, выделенного методом SOM, выявление в их пределах ключевых участков и тщательное изучение границы перехода одного местоположения (класса) в другое. При этом весьма вероятно, что полученная в результате использования ИНС карта районирования будет иметь слишком много ошибок. В таком случае возможны два предположения: либо наши входные данные были выбраны и формализованы неточно, либо выбранный метод не пригоден для решения подобных задач.

Ответы на эти вопросы в конечном счете могут дать полевые исследования, которые проводились летом 2008 и 2009 гг. Целью этих работ было подтверждение результатов районирования, выполненного с использованием искусственных нейронных сетей. На карте районирования (полученной с помощью искусственных нейронных сетей) нами было выделено более 200 точек, включающих все разнообразие полученных классов для целей их тематической идентификации на местности, уточнения легенды карты, в том числе для проверки результатов районирования. После этого производилась привязка выбранных на карте точек к местности и определение точного местоположения данного участка наблюдения (контрольной точки). Затем каждый участок исследовался и описывался в ходе полевого выезда. Помимо общего описания мы на каждой контрольной точке отвечали на несколько вопросов:

- «Можно ли выделенную территорию рассматривать как единый (по геоморфолого-морфометрическим параметрам) природно-территориальный комплекс?» – в случае, когда мы территориально находимся в центре данного класса (типологического района).

- «Действительно ли есть существенные отличия данного пространственного выдела от соседнего? По каким критериям было проведено обособление того или иного выдела? Сохраняются ли эти закономерности для всего класса данных выделов?» – в случае, когда мы при полевой проверке данных территориально находились на границах перехода одного класса (выдела) в другой. Отметим, что границам перехода одного конкретного пространственного выдела в другой уделялось особое внимание, поскольку это давало возможность понять и интерпретировать данные переходы, квалифицируя их как появление тематически новых районов, или, наоборот, отнести их к ошибкам метода автоматизированного районирования.

Проведенные работы позволили сделать важный вывод о полном или очень хорошем совпадении полученных методом ИНС тематических классов местоположений ландшафтов с данными полевых работ в 90% случаев. В относительно редких случаях (не более 3–4% всех наблюдаемых точек) отмечались очевидные ошибки в выделении границ тех или иных классов. Мы связываем это как с погрешностью исходной цифровой модели рельефа, которая бралась за основу нашего исследования, так и с наличием ошибок при выделении ИНС промежуточных классов. Полевые работы также помогли откорректировать и укрупнить многие классы, которые, в частности, были выделены в результате влияния фактора экспозиции.

**3.3. Урбогеосистемы г. Казани.** Как уже отмечалось, для осуществления градостроительной политики недостаточно иметь надежную информацию о ландшафтной структуре города, необходим также учет социально-экономических факторов. Последние отражены на картах функционального зонирования города. Именно учет функциональной дифференциации территории, определяемой хозяйственной деятельностью людей, позволяет в совокупности с оценкой ландшафтных характеристик города создать наиболее адекватную модель пространственной организации городской территории. В этом случае каждый выдел, появившийся на новой картографической модели, может

выступать в качестве базовой территориальной единицы для самого широкого спектра решаемых задач. Комплексирование ландшафтной структуры, отражающей по своей сути системное взаимодействие геокомпонентов, с функциональным зонированием, также являющимся интегративным показателем видов, силы и интенсивности антропогенного воздействия на окружающую среду города, дает нам особое территориальное образование – *урбогеосистему*. Именно урбогеосистемы, на наш взгляд, являются той операционно-территориальной единицей, на основе которой в городе должна проводиться его экологическая оценка, разворачиваться система геоэкологического и социального мониторинга, разрабатываться и уточняться генплан, решаться многие другие градостроительные задачи.

#### 4. Выводы

Разработаны методические подходы по урболандшафтному картографированию территории крупного города с использованием современных информационных технологий: искусственных нейронных сетей Кохонена. При создании ландшафтной карты урбанизированных территорий в качестве наиболее надежного и информативного геокомпонента выступает рельеф местности. Автоматизированная классификация морфогенетических типов рельефа по его морфометрическим параметрам позволяет идентифицировать ландшафтную структуру урбанизированных территорий с заданным уровнем генерализации (район, подрайон-тип местности, урочище и т. д.). Интегрирование полученной ландшафтной структуры с функциональным зонированием города дает нам особое территориальное образование – *урбогеосистему*. Урбогеосистемы являются базовой операционно-территориальной единицей, на основе которой должен решаться многочисленный спектр градостроительных задач.

#### Summary

*O.P. Yermolaev, R.N. Selivanov. Landscape-Ecological Mapping of Urban Areas Using Artificial Neural Networks Approach (on the example of Kazan).*

The efficiency of city management to a large extent depends on the existence of appropriate cartographic model that systematically takes into account spatial inhomogeneity of an area. The methods for landscape-ecological mapping of urban areas are weakly developed at the moment. One of the reasons is a great amount of data to be involved, including both strongly transformed geocomponents of natural territorial complexes and social and economic environment. This paper deals with the method of landscape-ecological mapping of the city of Kazan using artificial neural networks.

**Key words:** landscape planning, landscape zoning, neural networks, GIS technologies, urban mapping, urban systems.

#### Литература

1. Макаров В.З., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Эколого-географическое картографирование городов. – М.: Науч. мир, 2002. – 196 с.
2. Ласточкин А.Н. Геоэкология ландшафта (экологические исследования окружающей среды на геотопологической основе). – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 1995. – 279 с.

3. Брагин П.Н. Морфодинамический анализ топологии ландшафта как базовая операция ландшафтного планирования: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Ярославль, 2005. – 24 с.
4. 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., 2005. – Т. 4. – С 348–356.
5. Sauer C. The Morphology of Landscape // University of California Publications in Geography. – 1925. – No 2. – P. 19–53.
6. Sinclair K.D., Knuth B.A. Non-industrial private forest landowner use of geographic data: a precondition for ecosystem-based management // Soc. Natur. Res. – 2000. – V. 13, No 6. – P. 521–536.
7. Zipper W.C., Wu J., Pouyat R.V., Pickett S.T.A. The application of ecological principles to urban and urbanizing landscapes // Ecolog. Appl. – 2000. – V. 10, No 3. – P. 685–688.
8. Ringold P.L., Alegria J., Czaplewski R.L., Mulder B.S., Tolle T., Burnett K. Adaptive monitoring design for ecosystem management // Ecolog. Appl. – 1996. – V. 6, No 3. – P. 745–747.
9. Payton S., Lindsey G., Wilson J., Ottensmann J.R., Man J. Valuing the benefits of the urban forest: a spatial hedonic approach // J. Environ. Plann. Manag. – 2008. – V. 51, No 6. – P. 717–736.
10. Lindsey G., Man J., Payton S., Dickson K. Property values, recreation values, and urban greenways // J. Park Recreat. Admin. – 2004. – V. 22, No 93. – P. 69–90.
11. Shandas V.K., Graybill J.K., Clare M.R. Incorporating ecosystem-based management into urban environmental policy: a case study from western Washington // J. Environ. Plann. Manag. – 2008. – V. 51, No 5. – P. 647–662.
12. Берг Л.С. Географические зоны Советского Союза. – М.: Географгиз, 1947. – Т. 1. – 397 с.
13. Солнцев Н.А. Природный географический ландшафт и некоторые его общие закономерности // Тр. Второго Всесоюз. геогр. съезда. – М., 1948. – Т. 1. – С. 258–269.
14. Сочава В.Б. Определение некоторых понятий и терминов физической географии // Докл. Ин-та географии Сибири и Дальнего Востока. – 1963. – Вып. 3. – С. 50–59.
15. Мамай И.И. Задачи, методология и методы ландшафтоведения в решении проблем рационального природопользования // Изв. Всесоюз. геогр. о-ва. – 1989. – Т. 121, Вып. 2. – С. 114–118.
16. Круглов И.С. История, современное состояние и перспективы освоения природных территориальных комплексов города Львова и окрестностей: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Киев, 1992. – 19 с.
17. Мильков Ф.Н. Человек и ландшафты. – М.: Мысль, 1973. – 237 с.
18. Миллер Г.П. Ландшафтные исследования горных и предгорных территорий. – Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1974. – 202 с.
19. Дмитрук О.Ю. Методика ландшафтного анализа урбанизированных территорий (на примере г. Киева). Автореф. ... дис. канд. геогр. наук. – Киев, 1993. – 21 с.
20. Тарасов Ф.В. О динамике природных процессов большого города и его ландшафтной структуре // 7 совещание по вопросам ландшафтоведения. – Пермь, 1974. – С. 86–89.
21. Любушкина С.Г. Ландшафтная карта Подмосковья. Масштаб 1:100 000. – М.: ООО АКЦ, 2005.

22. Макаров В.З., Пролеткин И.В., Чумаченко А.Н. Ландшафтно-экологический подход к изучению городской территории. – 2004. – URL: <http://www.seun.ru/books/Books/Kafistorii/Metod/SarPov200/V.html>, свободный.
23. Романова Э.П., Кондратьева Т.И. Программа дисциплины «ландшафтно-геоэкологические системы» // Образовательные магистерские программы по направлению «Экология и природопользование»: для гос. ун-тов. – М.: Изд-во геогр. фак. Моск. ун-та, 2007. – С. 184–189.
24. Kohonen T.N. Self-Organization and Associative Memory (Springer Series in Information Sciences. V. 8). – Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer-Verlag, 1984. – 255 p.
25. Савельев А.А. Моделирование пространственной структуры растительного покрова (геоинформационный подход). – Казань: Казан. гос. ун-т, 2004. – 244 с.
26. Ермолаев О.П. Эрозия в бассейновых геосистемах. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2002. – 265 с.
27. Ермолаев О.П., Игонин М.Е. Ландшафтное районирование и картографирование региона Среднего Поволжья // Георесурсы. – 2006. – № 2(19). – С. 20–23.
28. Мальцев К.А. Морфометрический анализ рельефа Республики Татарстан средствами ГИС-технологий: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Казань, 2006. – 23 с.
29. Дьяконов К.Н., Пузаченко Ю.Г. Теоретические положения и направления исследований современного ландшафтоведения // География. Общество, окружающая среда. Т. II. Функционирование и современное состояние ландшафтов / Под ред. К.Н. Дьяконова, Э.П. Романовой. – М.: Изд. дом «Городец», 2004. – С. 21–36.
30. Колбовский Е. Ландшафтное планирование в регионах российской провинции: проблемы, вопросы, «узкие места». – 2006. – URL: [http://rgo.msk.ru/commissions/cultural/2006\\_04\\_12-1.html](http://rgo.msk.ru/commissions/cultural/2006_04_12-1.html), свободный.

Поступила в редакцию  
07.06.10

---

**Ермолаев Олег Петрович** – доктор географических наук, профессор, заведующий кафедрой ландшафтной экологии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [Oleg.Yermolaev@ksu.ru](mailto:Oleg.Yermolaev@ksu.ru)

**Селиванов Ренат Наильевич** – аспирант кафедры ландшафтной экологии Казанского (Приволжского) федерального университета.

E-mail: [orange\\_k@list.ru](mailto:orange_k@list.ru)