

УДК 504.75:004.9:911.372  
DOI 10.17513/use.38091

## ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАГЕОСИСТЕМ ГОРОДА ДЛЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В СФЕРЕ ЭКОЛОГИИ

Ямашкин А.А., Ямашкин С.А., Шабайкина В.А.,  
Зарубин О.А., Кирюшин А.В.

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет  
имени Н.П. Огарева», Саранск, e-mail: yamashkinsa@mail.ru

На основе анализа научных работ, посвященных основным направлениям применения геоинформационных технологий для выявления закономерностей изменения территориальной организации, выделены основные подходы к проектированию баз электронных карт для геоэкологического анализа метагеосистем. Описанные в статье результаты направлены на развитие методов геоинформационного моделирования метагеосистем города для принятия управленческих решений в сфере экологии. Выполнена апробация технологии проектирования баз электронных карт в целях анализа территориальной структуры городского округа Саранска, выявлены основные тенденции изменения градостроительных структур на отдельных участках. Доказано, что базы электронных карт, создаваемые для целей геоэкологического анализа территориальной структуры, призваны сформировать единый информационный массив, в котором различные типы данных объединены в систему и позволяют комплексно подойти к процедуре оценки существующей градостроительной структуры и разработке мероприятий по ее усовершенствованию. Полученная в результате картографическая система играет роль основы для дальнейшего комплексного анализа территории, а также разработки проектных решений по ее развитию на отдельных участках. Распространение тематических электронных карт возможно посредством внедрения и использования геопортальных систем, предоставляющих доступ к интерактивной работе с различными тематическими геоэкологическими слоями.

**Ключевые слова:** территориальная структура, базы электронных карт, территориальное развитие, природный каркас, геоэкологическая ситуация, геопорталы, метагеосистемы

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00651 (<https://rscf.ru/project/22-27-00651/>).*

## GEOINFORMATION MODELING OF CITY METAGEOSYSTEMS FOR MANAGEMENT DECISIONS IN THE FIELD OF ECOLOGY

Yamashkin A.A., Yamashkin S.A., Shabaykina V.A.,  
Zarubin O.A., Kiryushin A.V.

National Research Ogarev Mordovia State University, Saransk, e-mail: yamashkinsa@mail.ru

Based on the analysis of scientific papers devoted to the main areas of application of geoinformation technologies to identify patterns of change in territorial organization, the main approaches to designing electronic map databases for the geoeological analysis of metageosystems are identified. The results described in the article are aimed at developing methods for geoinformation modeling of city metageosystems for making managerial decisions in the field of ecology. The technology for designing bases of electronic maps was tested in order to analyze the territorial structure of the urban district of Saransk, and the main trends in changes in urban structures in individual areas were identified. It has been proved that the databases of electronic maps created for the purpose of geoeological analyzing the territorial structure are designed to form a single information array in which various types of data are combined into a system and allow a comprehensive approach to the procedure for assessing the existing urban structure and developing measures to improve it. The resulting cartographic system serves as a basis for further comprehensive analysis of the territory, as well as the development of design solutions for its development in individual areas. Distribution of thematic electronic maps is possible through the introduction and use of geoportal systems that provide access to interactive work with various thematic geoeological layers.

**Keywords:** territorial structure, databases of electronic maps, territorial development, geoeological situation, natural framework, geoportals, metageosystems

*The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-27-00651 (<https://rscf.ru/project/22-27-00651/>).*

В соответствии с основными положениями, сформулированными в Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 г., террито-

риальное развитие должно осуществляться в первую очередь за счет совершенствования территориальной организации объектов экономики и системы расселения

с учетом принципов комплексного подхода и рационального природопользования [1]. В условиях обострения геоэкологических проблем рациональная организация территориальной структуры является одним из основных факторов, лежащих в основе эффективного управления пространственным развитием объектов любого иерархического уровня.

На современном этапе нормативно-правовые аспекты анализа территориальных структур основаны на процедуре территориального планирования. Являясь одной из составных частей градостроительной деятельности, территориальное планирование, в соответствии с Градостроительным кодексом Российской Федерации, ставит своей основной целью создание эффективной системы размещения объектов различных отраслей экономики, управления селитебными территориями, инженерно-транспортной инфраструктурой и охрану окружающей среды. Геоэкологический анализ метагеосистем городов для целей принятия управленческих решений, оптимизации процедур территориального планирования является одним из наиболее сложных в силу необходимости учета и моделирования широкого спектра природных, социальных и экономических процессов, локализованных на весьма ограниченной территории с высокой концентрацией населения, производств, объектов инфраструктуры, сложной системой функционального и градостроительного зонирования и др. В связи с этим решение ключевых прикладных задач геоэкологической оптимизации и территориального планирования метагеосистем на региональном и муниципальном уровнях в настоящее время в значительной степени основано на совершенствовании технологии применения геоинформационных и геопортальных систем, обеспечивающих создание электронных карт путем интерпретации массивов пространственно-временных данных о природных, социальных, экономических и экологических процессах и условиях местности [2], применения автоматизированных методик обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли [3].

Цель исследования – развитие методов геоэкологического обоснования территориального планирования на основе геоинформационного моделирования метагеосистем города для принятия управленческих решений.

### Материалы и методы исследования

Понятие «территориальная структура» было сформулировано и получило развитие в многочисленных работах ученых второй половины XX в. в условиях усиления масштабов воздействия человека на природу и активного развития процесса урбанизации. По А.П. Горкину, Е.Е. Демидовой, Л.А. Кадилевой, территориальная структура является признаком любой пространственной системы и представляет собой взаиморасположение, взаимосвязи и взаимодействия пространственно выраженных элементов сложного географического объекта, рассматриваемого как система [4]. Концепция территориальной структуры включает в себя последовательный анализ и оценку ключевых взаимосвязанных измеримых параметров интегрального пространственного исследования – концентрации, дифференциации, связности, композиции [5, 6].

Анализ территориальной структуры выполняется с целью разработки и реализации проектных решений по геоэкологической оптимизации процессов хозяйственного освоения и включает в себя оценку перечня факторов, под воздействием которых произошло ее формирование: природных, исторических, социально-демографических – а также особенностей застройки, размещения основных объектов производства, системы озеленения. В последние годы данному направлению прикладных геоэкологических исследований посвящены работы И.К. Лурье, Е.А. Балдиной, А.И. Прасоловой и др. [7], Б.И. Кочурова, А.Ю. Карандеева [8], О.А. Климановой, Е.Ю. Колбовского, О.А. Илларионовой [9], В.А. Низовцева, Б.И. Кочурова, Н.М. Эрман с соавт. [10] и др., систематизирующие опыт геоэкологического обоснования разработки планировочных решений на основе геоинформационных технологий в отношении различных городов Российской Федерации.

При исследовании взаимодействия природы, населения и техногенных систем города в качестве основных объектов рассматриваются метагеосистемы – закономерно организованные природные, социальные и техногенные подсистемы с пространственно распределенными структурными элементами и компонентами, генетически, структурно, функционально связанными между собой. Общая структура метагеосистем города приведена в таблице.

## Общая структура метагеосистем

Подсистемы	Структура и основные слои электронных карт метагеосистем	Научно-прикладные карты	
		Экологические процессы и проблемы	Оптимизация территориальной структуры землепользования
Природные	Геолого-тектоническое строение, морфо-структурные и морфоскульптурные формы рельефа, климат и приземные слои атмосферы, гидрологический режим поверхностных вод, гидрогеодинамика и гидрогеохимия подземных вод, структура почвенного покрова, растительность и животный мир, геосистемы (ландшафты)	Геоэкологическая диагностика состояния метагеосистем: геоэкологический потенциал, устойчивость геосистем, техногенное изменение и прогнозирование аномальных экологических явлений	Ландшафтно-экологическое зонирование
Социальные	Динамика и плотность населения, медико-демографическая ситуация: рождаемость, смертность, возрастная и половая структуры, национальный состав Объекты образования, культуры, торговли, предприятий питания, спорта, средств размещения и др.		
Техногенные	Промышленные и сельскохозяйственные предприятия, транспортная инфраструктура		



Рис. 1. Алгоритм проектирования электронных карт для анализа территориальной структуры

Основополагающими принципами исследования метагеосистем являются: 1) системность – исследование изучаемого объекта как пространственно-временного образования, функционирование которого обеспечивается потоками вещества, энергии и информации между отдельными элементами, подсистемами и внешней средой; 2) комплексность – сопряженный анализ всех аспектов функционирования с учетом взаимосвязи факторов, определяющих особенности деятельности социума и его взаимодействия с окружающей средой; 3) территориальность – изучение простран-

ственных группировок свойств элементов; 4) региональная целостность – учет показателей интегрированности, самостоятельности и автономности; 5) экологичность – регламентация исследований взаимодействия социума с окружающей природной и техногенной средой как единой целостной системой; 6) управляемость – ориентация на сознательную оптимизацию пространственной организации.

Системы электронных карт, используемые для анализа, оценки и мониторинга экологического состояния метагеосистем, значительно различаются по своей струк-

туре, функциональным возможностям, применяемому алгоритму сбора и обработки информации, что зависит от природных, исторических и социально-экономических особенностей территории. В общем виде алгоритм проектирования баз электронных карт для анализа территориальной структуры можно представить в виде следующей схемы (рис. 1).

Общий алгоритм исследования метагеосистем для выработки концепции геоэкологического обоснования территориального планирования включает следующие этапы: 1) сбор и систематизация информации: разработка базовой картографической основы ГИС; 2) дешифрирование многозональных космических снимков с составлением синтетической карты геосистем; 3) оценка значимости техногенных воздействий и прогнозирование экологических последствий; 4) ландшафтно-экологическое зонирование метагеосистем. Такой комплексный подход призван создать целостное представление о пространственно-временной организации взаимодействия природных, социальных и производственных подсистем, выделить закономерности происхождения, развития, динамики геосистем и их изменения в процессе хозяйственного освоения для принятия управленческих решений по оптимизации функционирования метагеосистем города.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Формирование структуры и баз данных региональной географической информационной системы (ГИС) «Мордовия» для экологического обоснования градостроительной документации г. Саранска и мониторинга состояния метагеосистем началось в конце XX в. [11]. Современная архитектура инфраструктура пространственных данных ГИС представлена на рис. 2.

Основные блоки ГИС: 1) подсистема сбора, обработки, анализа и управления пространственными данными; 2) распределенное облачное хранилище; 3) геопортальная система. Процессы систематизации пространственных данных основаны на знаниях о геосистемах как иерархически упорядоченных совокупностях различных составляющих географической оболочки, которые связаны между собой потоками веществ и энергии.

Формирование территориальной структуры г. Саранска происходит под влиянием широкого спектра факторов, наибольшее

значение среди которых имеют позиционные, природные и исторические. Для решения поставленных задач была создана система карт, отражающая особенности динамики и развития процессов экологического взаимодействия региональных и локальных природных, социальных и техногенных систем, ориентированная на геоэкологическую диагностику состояния метагеосистем: анализ структуры геосистем, развития планировочной системы города, геоэкологического потенциала, устойчивости и техногенного изменения геосистем, ландшафтно-экологическое зонирование.

**Карты природного потенциала.** В качестве центрального звена комплекса карт природы (таблица) выступает синтетическая карта геосистем, Характерными чертами вмещающего природного ландшафта являются выраженная инсоляционная асимметрия склонов, доминирование выпукловогнутых склонов, определяющих смену лесных типов геосистем приводораздельных пространств лугово-степными на нижних участках склонов.

**Анализ карт развития планировочной системы города** Саранска позволил выделить 7 этапов смен состояний метагеосистем: 1) крепостной город (от основания в 1641 г. до разрушения крепости в середине XVIII в.); 2) слободской город (период до проектирования Генерального плана межевания конца 1785 г.); 3) реконструкция города (этап от старта воплощения плана реконструкции до 1820-х гг.); 4) упорядочение квартальной планировки города (до революции 1917 г.); 5) придание городу «советского» облика (завершая периодом, включающим годы восстановления страны после Великой Отечественной войны); 6) индустриальная реконструкция; 7) комплексная реконструкция (в 1990-е гг. и до настоящего времени) [11]. Структура природного и культурного наследия в метагеосистемах региона отражена на геопортале «Природное и культурное наследие Мордовии. Путешествуем с Русским географическим обществом» (рис. 3).

Анализ и оценка смен состояний метагеосистем позволили провести типологию территории города по особенностям градостроительного освоения и сформулировать возможные ограничения их развития.

**Карты геоэкологического потенциала** отражают способность природной системы удовлетворять потребности населения в качественной среде, устойчивость геосистем к техногенным нагрузкам.

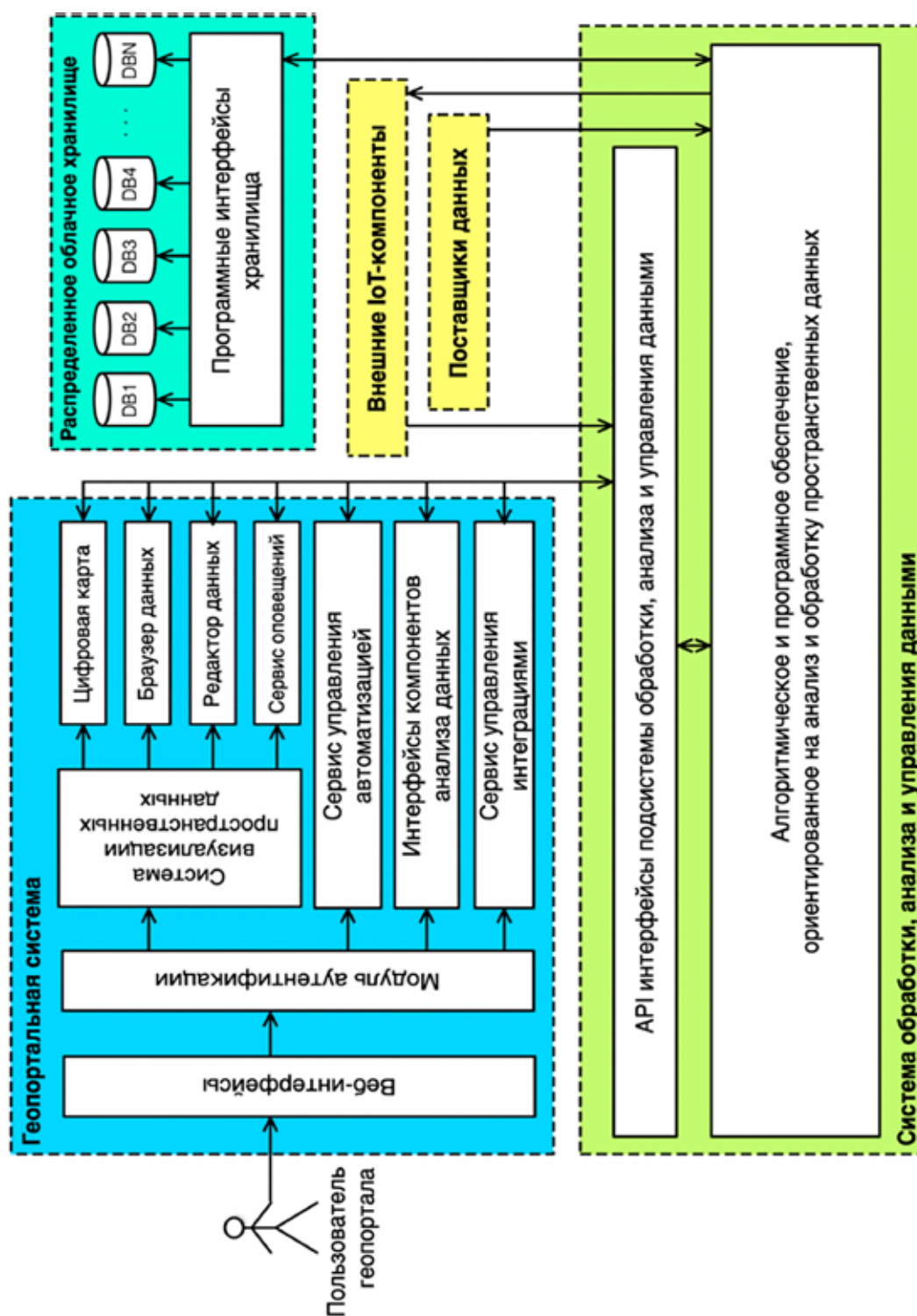


Рис. 2. Схема цифровой инфраструктуры пространственной информации

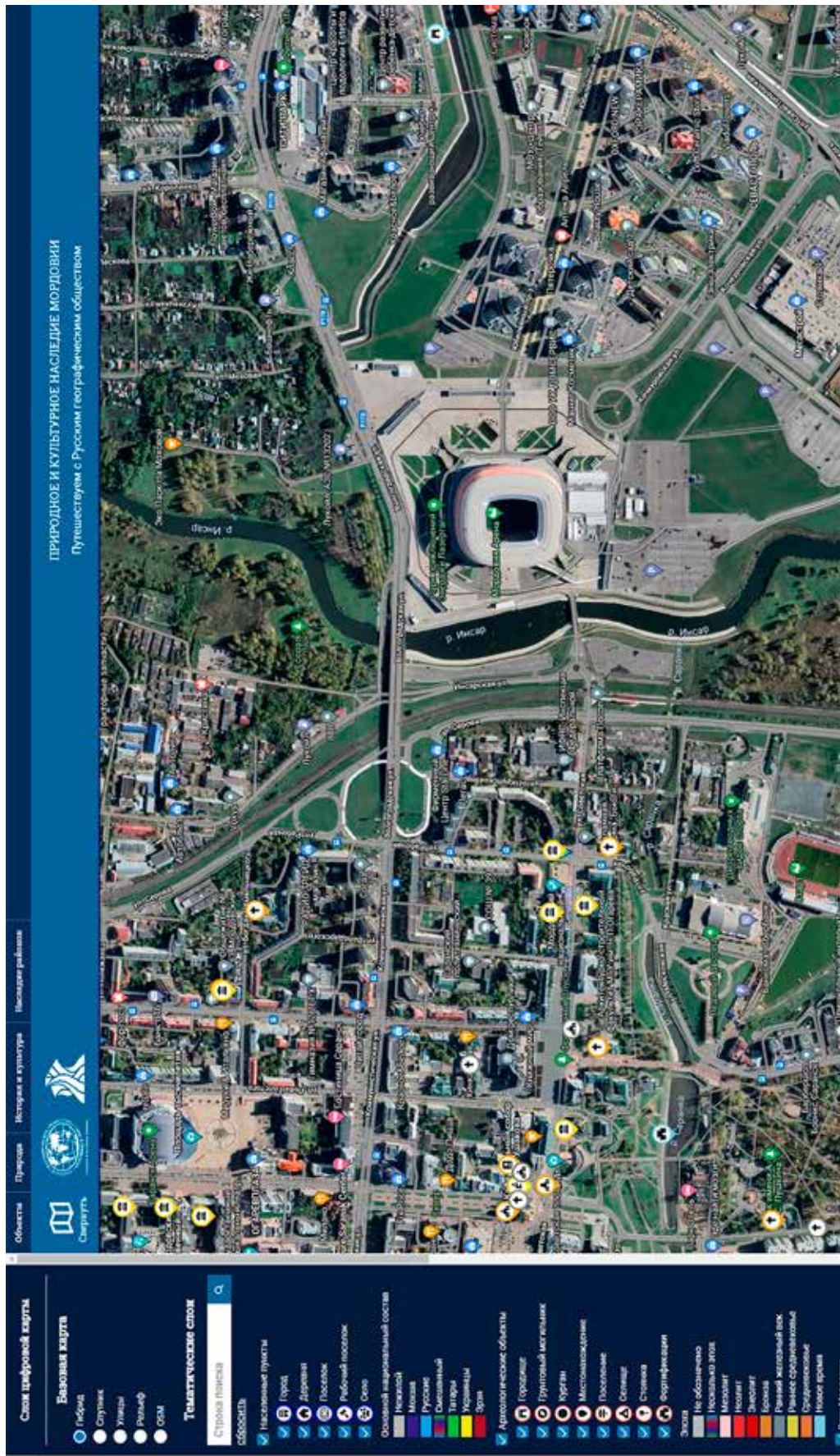


Рис. 3. Страница геопортала «Природное и культурное наследие Мордовии. Путешествуем с Русским географическим обществом»

Геоэкологический анализ развития метагеосистем г.о. Саранск с использованием геоинформационного моделирования показал, что в качестве важнейшего лимитирующего фактора развития выступают водные ресурсы водоносного карбонатно-пермского карбонатного горизонта. В результате активного водохозяйственного освоения Саранского месторождения образовалась депрессионная воронка, которая охватила значительную часть центральной Мордовии. Абсолютная отметка уровня в 2010 г. по центру депрессии составила 55 м. Последующее сокращение водозабора определило подъем уровня вод до 0,45 м в год. Современная площадь депрессионной воронки по пьезоизогипсе 75 м на 2021 г. составляет 222,55 км<sup>2</sup>. Изменение гидрогеодинамических процессов определило ухудшение качества питьевых вод за счет притока минерализованных вод из нижележащих водоносных горизонтов и восточной Мордовии.

Дальнейшее освоение эксплуатационных ресурсов Саранского месторождения предполагает разработку и реализацию программы стратегического развития водного хозяйства Республики Мордовия – снижение общей антропогенной нагрузки экономики на окружающую среду, повышение эффективности потребления водных ресурсов, улучшение правового регулирования природопользования.

**Карты устойчивости геосистем.** Как показывает практика, наибольшую значимость для градостроительного освоения имеет информация о структуре геологической среды, развитии экзогеодинамических процессов (затопление, подтопление, оползнеобразование, заболачивание и т.п.) и геохимическая устойчивость ландшафтов к накоплению продуктов техногенеза, что важно учитывать не только для обеспечения безопасности населения, моделирования геоэкологических рисков в условиях природного режима функционирования геосистем, но и в условиях техногенеза.

Для целей геоэкологического обоснования территориального планирования города природные и природно-техногенные процессы должны описываться по одинаковой схеме: вид явления, место, вероятное время проявления, интенсивность, возможные последствия и экономический ущерб, мероприятия по предотвращению или смягчению геофизических, геохимических и других воздействий на метагеосистемы.

**Карты техногенного изменения метагеосистем.** Для целей экологического обо-

снования территориального планирования урбанизированных территорий проведение ландшафтно-геохимического анализа позволяет выявить закономерности распределения загрязняющих веществ в отдельных компонентах и подсистемах городской среды. Данный подход предусматривает оценку степени геохимической трансформации метагеосистем на отдельных исторических этапах развития территории с последующей подготовкой картографических материалов и выделением участков с различной динамикой загрязнения.

Оценка и прогноз техногенного воздействия на геосистемы реализуется через расчет показателей концентрации химического элемента в пыли, накопленной снегом, суммарный показатель загрязнения снежного покрова. Для количественной оценки степени загрязнения почвенного покрова рассчитывались коэффициенты концентрации химических элементов и суммарный показатель загрязнения почв. Обобщенная ассоциация химических элементов, накапливающихся ( $K_c > 1,5$ ) в почвах городских ландшафтов, имеет вид  $Pb_{5,7} - Sn_{3,3} - Cu_{3,2} - Zn_{2,4} - Mo_{1,6}$ . На отдельных участках в них аккумулируются хром, стронций, галлий, никель, ниобий, барий, ванадий и серебро. Сопряженный анализ загрязнения почв и снежного покрова комплексом химических элементов позволил выделить участки реликтового, устойчивого, прогрессирующего загрязнения [12, 13].

Анализ геохимических данных для целей геоэкологической оптимизации градостроительной структуры определяется двумя основными векторами. С одной стороны, результаты геохимических исследований могут свидетельствовать об основных тенденциях развития геоэкологической ситуации на урбанизированной территории в связи с изменением объемов и масштабов промышленного производства, конфигурации транспортных путей и инженерных коммуникаций. Результаты геоинформационного моделирования распределения загрязняющих веществ используются для прогнозирования развития геоэкологических ситуаций. С другой стороны, данные материалы сами могут выступать в качестве исходных данных для внесения изменений в документы территориального планирования, являясь одним из инструментов выделения ключевых направлений дальнейшего развития территориальной структуры, гармонизации взаимодействия природных, социальных и производственных подсистем.

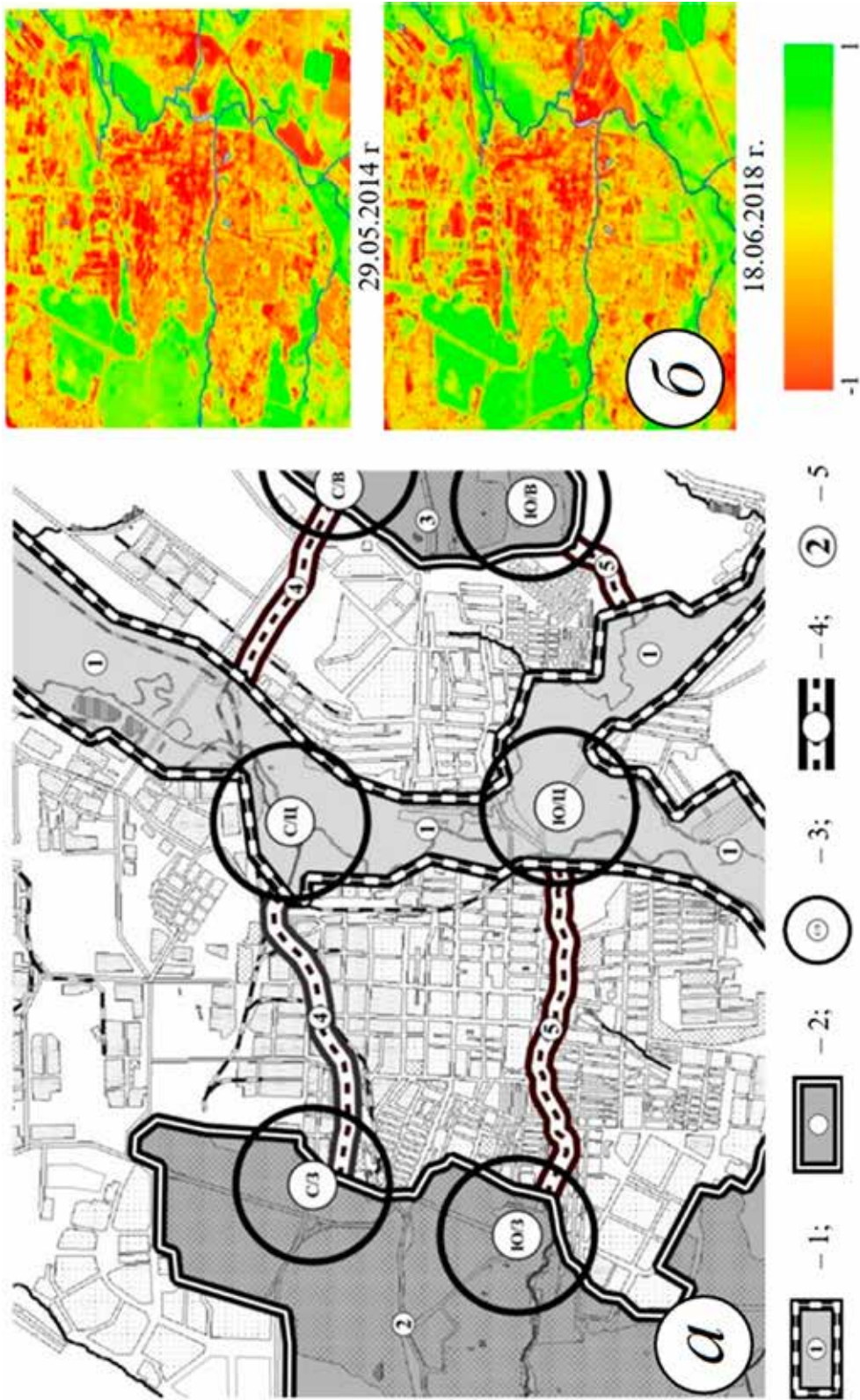


Рис. 4. Моделирование ландшафтно-экологического каркаса:  
 а) зоны ландшафтно-экологического равновесия г. Саранска: 1) субмеридиональная водно-зеленая зона экологического равновесия («Ц»); 2) основные зеленые массивы в пригороде; 3) узлы экологического равновесия;  
 4) основные субиригационные водно-зеленые системы; б) расчет NDVI для оценки продуктивности биомассы растительности



Анализ уровней техногенного загрязнения метагеосистем г.о. Саранск показал, что наибольшие концентрации тяжелых металлов наблюдались в районах размещения основных транспортных артерий и примыкающих к ним участкам жилой застройки. Внесенные изменения в Генеральный план городского округа, в частности организация транспортных развязок и объездных дорог, позволили снизить техногенные нагрузки на окружающую среду, как непосредственно в местах строительства новых путепроводов, так и на прилегающих территориях, в местах скопления автотранспорта на подъездах к основным магистралям, что подтверждено результатами последующих геохимических исследований.

**Ландшафтно-экологические карты оптимизации функционирования метагеосистем.** Для целей геоэкологического обоснования территориального планирования метагеосистем города разработан комплекс электронных карт, содержащих сведения о структуре природных и антропогенных комплексов и ландшафтов, исторических этапах пространственного развития и современной территориальной структуре городской среды, а также об основных тенденциях развития деструктивных экологических ситуаций.

В соответствии с результатами экологического картографирования в структуре метагеосистем г. Саранска были выделены основные элементы ландшафтно-экологического каркаса – леса пригородной зоны и садово-парковые комплексы, размещенные в пределах пойменных комплексов р. Инсар и его основных притоков, и соединенные между собой элементами зеленых и водно-зеленых коридоров (рис. 4).

Система ландшафтно-экологических зон (составных частей метагеосистемы города) призвана минимизировать геоэкологические риски, связанные с развитием геоэкологическими процессами, обеспечить очистку нижних слоев тропосферы, регулирование поверхностного и подземного стока, сохранение растительности и среды обитания в целом. Расчет вегетационных индексов показал, что основные элементы ландшафтно-экологического каркаса соответствуют нормативным показателям и являются достаточными для выполнения природоохранных функций.

### Заключение

Важнейшими объектами современных экологических исследований выступают

метагеосистемы – географические объекты, формирующиеся в результате взаимодействия физико-географических, историко-культурных, социально-экономических, политико-административных, технологических и иных факторов. Ключевыми аспектами исследования метагеосистем являются формулировка целей и ориентиров устойчивого развития территории и формирование систем обеспечения управления. Основопологающими принципами исследования являются: 1) системность; 2) комплексность; 3) территориальность; 4) региональная целостность; 5) экологичность; 6) управляемость.

Гибкими и универсальными средствами для исследования сложной иерархической системы метагеосистем города являются ГИС-технологии, обеспечивающие сбор, обработку, хранение и визуализацию пространственной информации о состоянии природных, социальных и производственных систем, их взаимодействии. Их практическая востребованность заключается, прежде всего, в оперативности представления информации и в точной пространственной привязке данных. Базы электронных экологических карт, создаваемые для целей территориального управления, призваны сформировать единый информационный массив, в котором различные типы данных объединены в систему и позволяют комплексно подойти в процедуре оценки существующей градостроительной структуры и разработке мероприятий по оптимизации ее функционирования.

Ключевую роль в системе управления должны играть геопорталы, обеспечивающие доступ к информационным ресурсам о природно-социально-экономических объектах регионов (стран). Открытая система электронных карт оптимизирует мониторинг динамики и эволюции территориальной структуры, изменения геоэкологического потенциала, техногенной трансформации природной среды, оценку устойчивости геосистем и прогнозирование деструктивных процессов, а следовательно, оптимизирует процесс гармонизации развития метагеосистем населенного пункта.

### Список литературы

1. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 13 февраля 2019 года № 207-р «Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года» (с изменениями на 30 сентября 2022 года). [Электронный ресурс]. URL: <https://rulaws.ru/government/Rasporiyazhenie-Pravitelstva-RF-ot-13.02.2019-N-207-r/> (дата обращения: 04.08.2023).

2. Ямашкин С.А., Ямашкин А.А., Федосин С.А. Разработка проектно-ориентированной инфраструктуры пространственных данных с применением облачных технологий // Радиопромышленность. 2019. № 3. С. 79–90.
3. Yamashkin S.A., Yamashkin A.A., Zanozin V.V., Varmin A.N., Radovanovic M.M. Improving the efficiency of deep learning methods in remote sensing data analysis: Geosystem approach // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 179516–179529.
4. Горкин А.П., Демидова Е.Е., Кадилова Л.А. Территориально неограниченные ресурсы стран мира // География мирового развития: Сборник научных трудов. М.: ООО «Товарищество научных изданий КМК», 2016. С. 148–155.
5. Полян П.М. Территориальные структуры – урбанизация – расселение: теоретические подходы и методы изучения. М.: Новый хронограф, 2014. 394 с.
6. Родоман Б.Б. Поляризованная биосфера. Смоленск: Ойкумена, 2002. 336 с.
7. Лурье И.К., Балдина Е.А., Прасолова А.И., Прохорова Е.А., Семин В.Н., Чистов С.В. Серия карт эколого-географической оценки земельных ресурсов территории Новой Москвы // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2015. № 4. С. 49–58.
8. Кочуров Б.И., Карандеев А.Ю. Геоэкологическое картографирование и оценка городского пространства с применением сеточного векторного ГИС-анализа // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2018. Т. 24, № 1. С. 310–320.
9. Климанова О.А., Колбовский Е.Ю., Илларионова О.А. Экологический каркас крупнейших городов Российской Федерации: современная структура, территориальное планирование и проблемы развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2018. Т. 63, № 2. С. 127–146.
10. Низовцев В.А., Кочуров Б.И., Эрман Н.М., Мирошенко И.В., Логунова Ю.В., Костовска С.К., Ивашкина И.В., Алексеева В.О. Ландшафтно-экологические исследования Москвы для обоснования территориального планирования города. М.: Прометей, 2020. 342 с.
11. Культурный ландшафт города Саранска (геоэкологические проблемы и ландшафтное планирование) / Науч. ред. и сост. А.А. Ямашкин. Саранск: Изд-во Мордовского университета, 2002. 205 с.
12. Информационный бюллетень о состоянии недр территории Приволжского федерального округа за 2018 год. Вып. 18: в 2 кн. Кн. 1. Подземные воды / Приволж. РЦ ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология». Н. Новгород, 2019. 292 с.
13. Информационный бюллетень о состоянии недр территории Приволжского федерального округа за 2021 год. Вып. 21: в 2 кн. Кн. 1. Подземные воды / Приволж. РЦ ГМСН ФГБУ «Гидроспецгеология». Н. Новгород, 2022. 318 с.