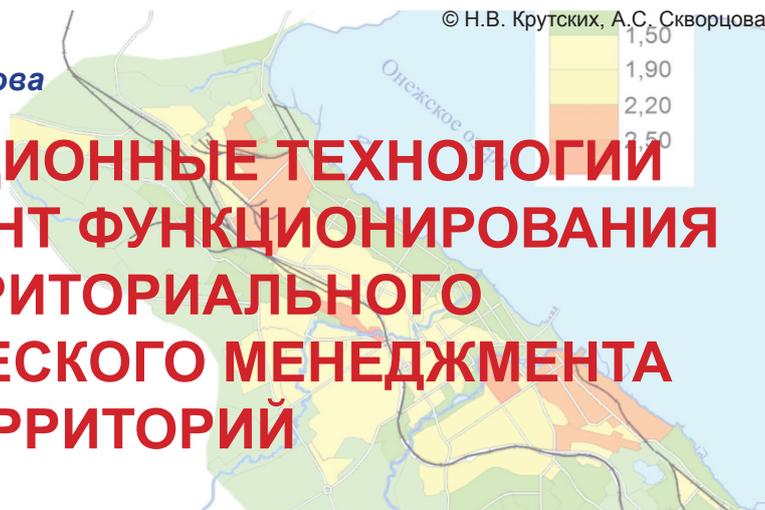


УДК 502.3/528.94

Н.В. Крутских, А.С. Скворцова

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК ИНСТРУМЕНТ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МЕНЕДЖМЕНТА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ



Применение ГИС-технологий

Постоянное изменение качества компонентов природной среды требует рационального управления, направленного на его улучшение. Методом объединения экологических и геоэкологических исследований, от оценки состояния до корректирующих мероприятий с постоянным контролем, является экологический менеджмент. Территориальный геоэкологический менеджмент (ТГЭМ) урбанизированных территорий представляет собой комплексную систему оценки, контроля и управления геоэкологическими и социально-экономическими показателями в пределах города, как сложной системы с геоэкологическими, социальными и экономическими компонентами.

В рамках внедрения ТГЭМ возможно решение различных задач, включающих:

- Управление качеством компонентов природной среды урбанизированной территории.
- Выявление и оценка негативных воздействий на компоненты геоэкосистемы.
- Оценку трансформации компонентов природной среды.
- Предупреждение и прогноз неблагоприятных факторов среды.
- Разработку и осуществление мероприятий, направленных на улучшение геоэкологической ситуации.
- Организация экологически безопасных производственных процессов.
- Содействие в создании инновационных геоэкологических технологий.
- Сбор данных о состоянии геоэкосистемы по производственным объектам.
- Обеспечение устойчивого развития муниципального образования.
- Обеспечение баланса законов природы и общества.
- Создание эффективных эколого-экономических моделей.

Важным инструментом проведения геоэкологического менеджмента являются ГИС-технологии, позволяющие накапливать разные объемы данных, проводить их обработку, создавать прогнозы, т.е. своевременно получать геоэкологическую информацию и оперативно принимать управленческие решения. Функциональные возможности ГИС позволяют интегрировать пространственные и непространственные данные, вместе с функциями анализа и моделирования процессов, что позволяет использовать эту технологию как платформу для управления качеством городской среды [1].

В качестве тестовой территории разработки системы территориального геоэкологического менеджмента выбрана территория г. Петрозаводска.

Методика организации ТГЭМ. Наиболее оптимальной схемой геоэкологического менеджмента является методология PDCA («Plan-Do-Check-Act») «планирование – выполнение – контроль – действие».

«Планирование» включает разработку целей и процессов, необходимых для получения результатов, соответствующих экологической политике. В рамках ТГЭМ урбанизированных территорий добавляется их классифицирование с определением типа, который обуславливает дальнейшую методику проведения оценочных и природоохранных действий. Согласно ранее проведенной типизации городов Карелии [6], Петрозаводский городской округ относится к I типу городов. Данный тип объединяет полифункциональные крупные города с количеством жителей более 100 тыс. чел. и плотностью населения более 3 тыс. человек на 1 км², характеризующиеся международными типами связей и имеющие железнодорожное и водное сообщение.

Целью ТГЭМ данного типа городов является постоянная оценка экологических рисков, снижение негативного воздействия и создание условий для улучшения качества природной среды.

«Выполнение» – организация и внедрение процессов. На данном этапе определяется методика проведения полевых и аналитических работ, методы оценки состояния компонентов экогеосистемы, проводится геоэкологическое районирование. Для достижения целей ТГЭМ г. Петрозаводска оптимальным является комплексное сочетание геохимических методов исследования. Это связано с тем, что здесь основной проблемой остается изменение химического состава компонентов природной среды. Оценка состояния компонентов природной среды ведется с учетом функциональной нагрузки территорий. Для сбора информации о состоянии компонентов природной среды проводится обследование почв и грунтов, донных осадков, снегового покрова, поверхностных и подземных вод, растительности. Сеть наблюдений по компонентам среды разворачивается по ключевым участкам или по равномерной сетке и должна покрывать всю территорию города. Аналитические работы проводятся с использованием современных, преимущественно высокопрецизионных методов определения вещества. К ним относятся методы спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS), атомно-абсорбционной спектрофотометрии. В связи с разнонаправленностью техногенных нагрузок, часто накладывающихся друг на друга, проводится анализ максимального числа компонент. Обязательны к определению такие показатели, как: рН, содержание тяжелых металлов, нефтепродуктов, для водных проб – содержание K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- , $P_{мин}$, $P_{общ}$, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- . Также для I типа урбанизированных территорий оправдано использование геофизических методов исследования, выявляющих участки скрытого загрязнения, а также определяющих влияние физических полей на биоту.

Интерпретация результатов направлена на оценку состояния отдельных компонентов природной среды и на общее интегральное состояние экогеосистемы города. В качестве показателей состояния природных сред могут выступать кларки концентраций, коэффициенты концентраций, коэффициенты загрязнений. Интегральные оценки даются по результатам определения суммарного показателя загрязнения (Zc) [10]. Также используется показатель экологической опасности (ПЭО), который отражает общий суммарный уровень загрязнения [7]. В приоритете для городской территории остается оценка воздействия состояния окружающей природной среды на биотическую составляющую геоэкоосистемы. Такая оценка проводится по статистическим данным заболеваемости населения, преимущественно детей. Также важна оценка взаимосвязи качества среды и состояния местной флоры и фауны. Здесь применимы различные методики биоиндикации:

палиноиндикация [2, 5], изучение морфологии листовых пластинок [4], оценка биоразнообразия [9] и др.

На стадии «контроль» осуществляется мониторинг компонентов природной среды урбанизированной территории, оценка состояния компонентов экогеосистемы города, анализ их изменений под воздействием различных внешних и внутренних факторов. Также определяется уровень достижения целей, выполнения задач, законодательных и других требований.

«Действие» включает комплекс корректирующих мероприятий, разработку и внедрение различных природоохранных и природосберегающих мероприятий, выполнение действий по постоянному улучшению результативности системы геоэкологического менеджмента.

Таким образом, система ТГЭМ накапливает значимое количество атрибутивных, пространственных данных, описывающих геоэкологическую систему города. Обработка, анализ, визуализация полученной информации производится посредством *геоинформационных технологий*. ГИС позволяют управлять пространственными данными в форме цифровых слоев карты, с возможностью визуализации реальных объектов векторными и растровыми форматами; трансформировать картографические проекции и изменять системы координат; осуществлять картометрические операции, операции оверлея; создавать и обрабатывать цифровые модели объектов; проводить пространственное моделирование, проектирование и создание картографических изображений [3].

Основными функциями ГИС в обеспечении системы ТГЭМ являются:

- накопление, хранение, визуализация получаемых данных;
- моделирование исследуемых природных сред;
- оценка закономерностей пространственного распределения геоэкологических показателей;
- содействие принятия решений в области регулирования и контроля за состоянием среды;
- возможность прогнозирования геоэкологических ситуаций.

Создание базы данных ТГЭМ основывается на накоплении разнородной информации, ее упорядочивании и хранении в соответствующих блоках (рис. 1). Для решения любых геоэкологических вопросов в первую очередь необходима информация о внутренних и внешних факторах, формирующих геоэкоосистему. Эти факторы в первом случае отражают природные условия, во втором – наложенные антропогенные. Вся информация соединяется в первый информационный блок базы, где хранятся данные о геологии, геоморфологии, гидрографии,

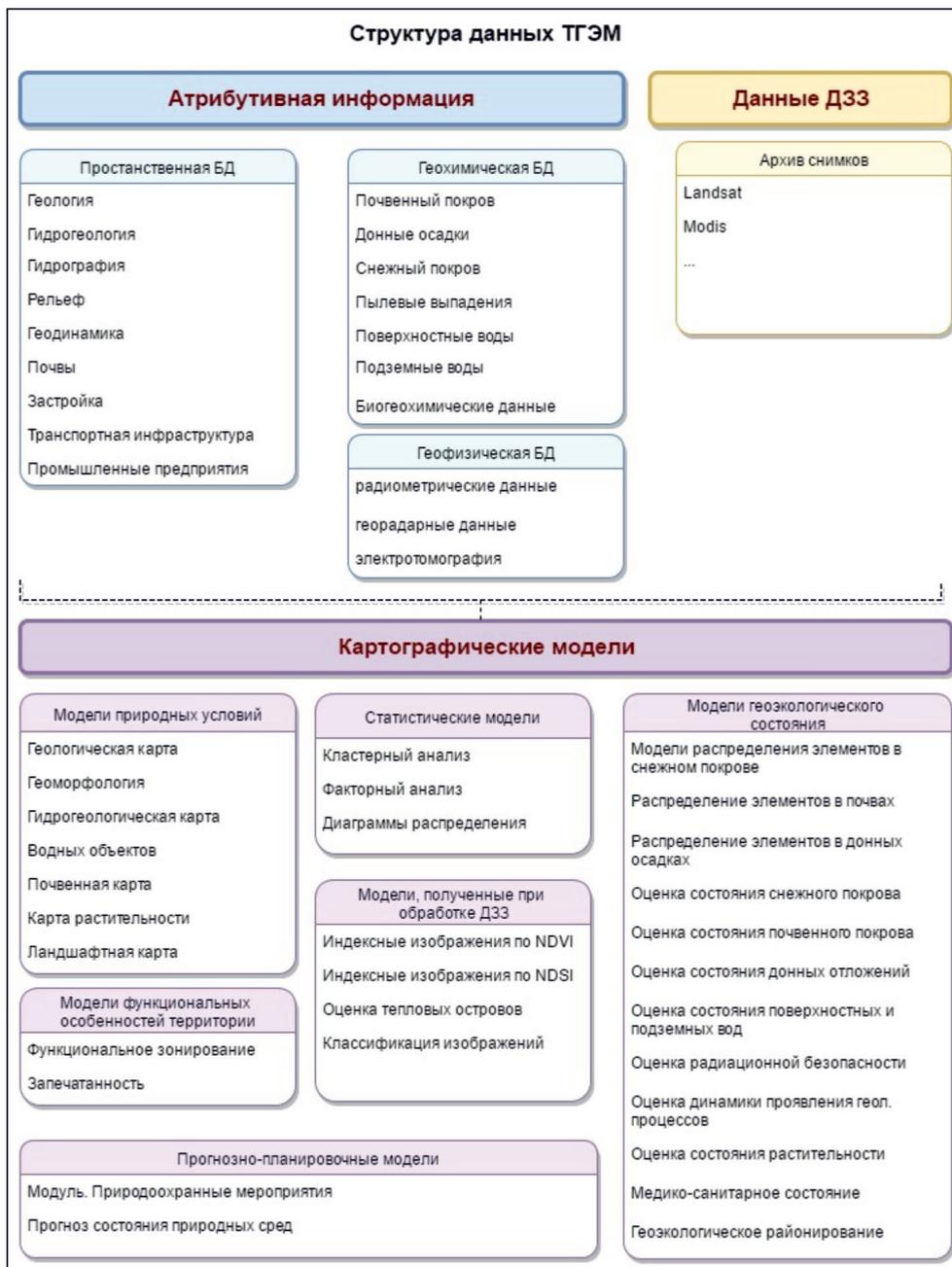


Рис. 1. Структура и содержание базы данных для ТГЭМ

гидрогеологии, почвенном покрове, застройке, транспортной инфраструктуре, промышленности. Атрибутивные таблицы содержат поля с основными определениями графических примитивов: их типы (точка, линия, полигон) и идентификатор, а также дополнительные характеристики, несущие количественную информацию о свойствах объектов.

Следующие блоки фиксируют первичные результаты геоэкологических исследований и включают данные по геохимии компонентов геоэкосистемы, геофизических свойствах приповерхностной части литосферы, экзогенных геологических процессах. Информация в данных блоках состоит преимущественно из фактографического материала.

К первичной информации, позволяющей решать геоэкологические задачи в пределах урбанизированных территорий, также необходимо отнести данные дистанционного зондирования Земли. В настоящее время к наиболее доступным средствам дистанционного зондирования относится программа Landsat, материалы которой находятся в открытом доступе на сайте NASA (earthexplorer.usgs.gov).

Анализ получаемой информации позволяет визуализировать тематическую информацию, а также создавать картографический материал на основе новых обработанных атрибутивных данных.

Базовые векторные слои, содержащие информацию об основных топографических ориентирах,

данных о поверхностной гидросфере, дорожной сети, городской застройке, создаются на основе открытых данных проекта OpenStreetMap (OSM). Отдельные объекты интереса выносятся на основе дешифрирования космоснимков высокого разрешения по прямым и косвенным признакам. Работа по редактированию базовых слоев ведется с использованием настольных ГИС, таких как ArcView 9.2 (ESRI) и QGIS. При построении цифровых моделей используются расширения ГИС для анализа данных.

Блок данных по *функциональным особенностям территории* отражает системы взаимодействия человеческого общества и природной среды. Функциональное зонирование представляет собой выделение в пределах города относительно однородных по природным особенностям и техногенной нагрузке участков. Данный слой формируется с учетом данных дешифрирования космоснимков, «Карты градостроительного зонирования Петрозаводского городского округа». Уточнение результатов зонирования, проведение границ между производ-

ственными и селитебными зонами завершается по тепловым снимкам Landsat. Показатели яркости в пределах селитебных территорий значительно ниже промышленных, что позволяет использовать этот показатель при мониторинге техногенного воздействия. Согласно данным функционального зонирования в пределах города выделяются промышленные, селитебные, транспортные, водохозяйственные, рекреационные зоны (рис. 2).

Статистические методы в геоэкологических исследованиях позволяют отразить взаимосвязи между показателями современного состояния среды и внешними или внутренними факторами геоэкосистемы. Факторный анализ, проведенный по результатам геохимического опробования, выявил несколько факторов, оказывающих влияние на распределение элементов в почвах города, что позволяет пространственно определить территории максимального техногенного воздействия. Визуализация результатов анализа и пространственная интерпретация отражаются на моделях распределения значений основных факторов (рис. 3).

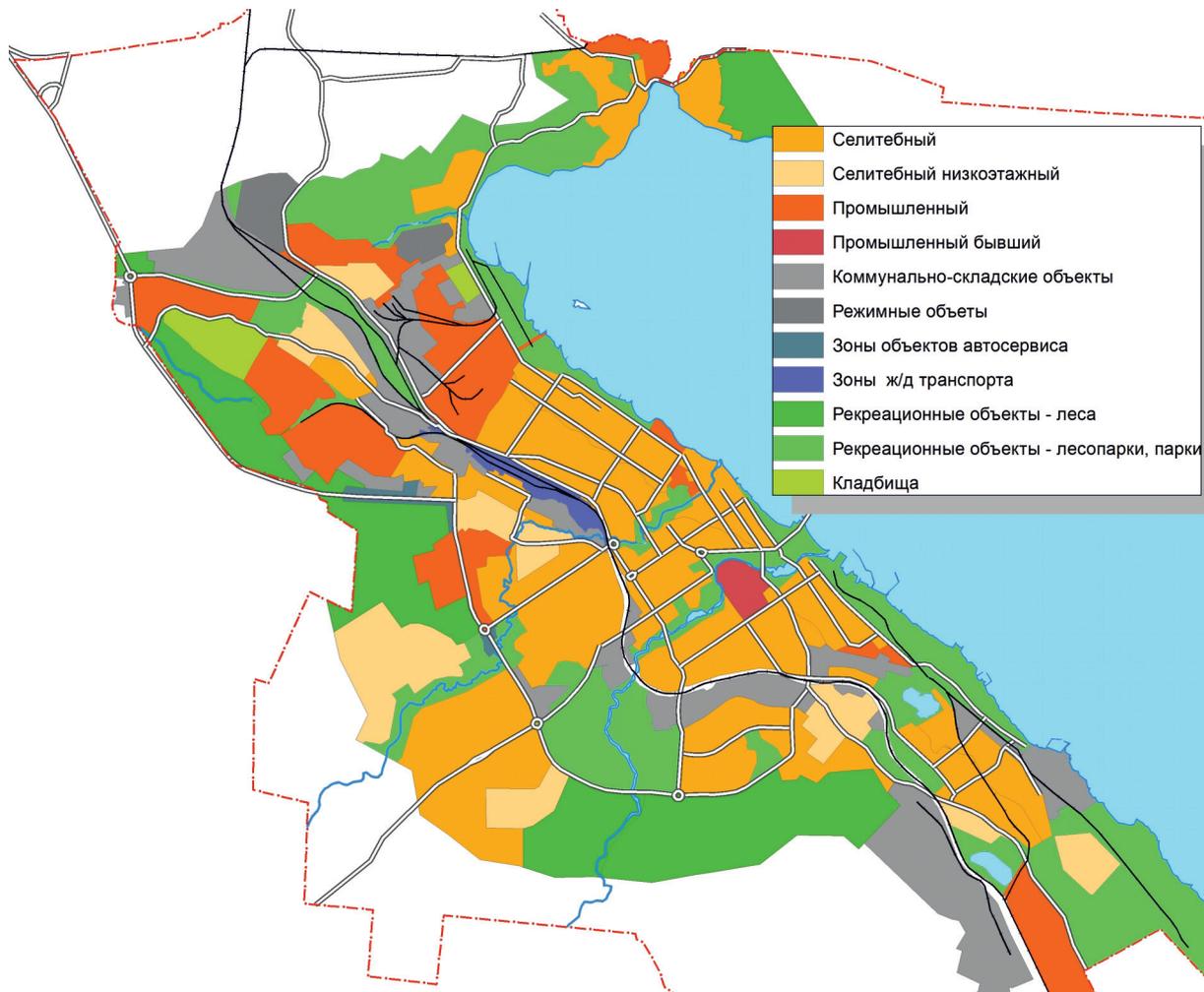


Рис. 2. Модуль – «Функциональная организация земель»

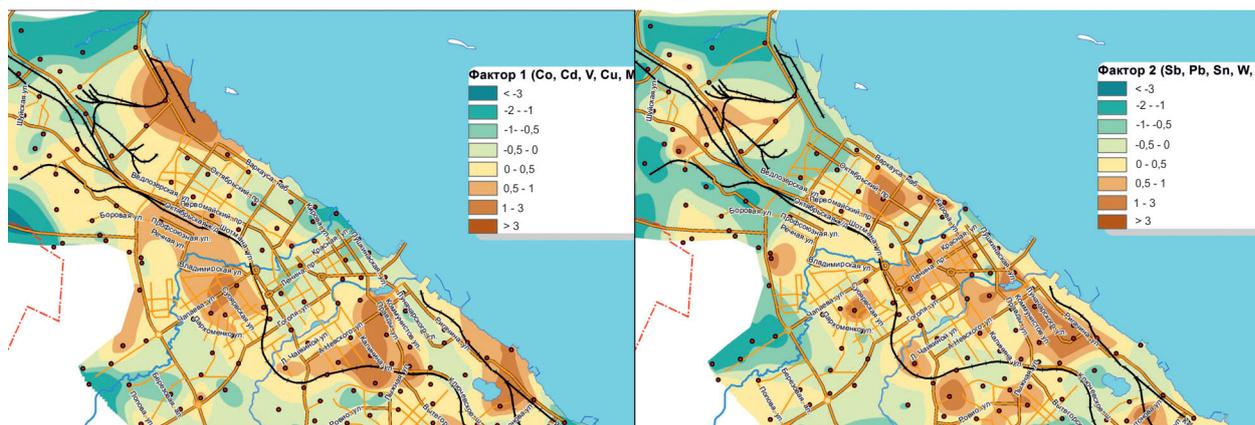


Рис. 3. Пространственное распределение значений факторов по данным почвенного геохимического опробования 2011 г.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются современной достоверной базой для решения задач, связанных с изучением экологического состояния территорий. В качестве оценки уровня состояния биомассы на конкретный промежуток времени применяется нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), который позволяет выявлять различные растительные комплексы и основан на различиях в отражении излучения разных длин волн. Многочисленные исследования подтверждают взаимосвязь между индексом NDVI и изменениями, происходящими в растительности при воздействии негативных факторов среды [8]. Высокие значения разности индексов отражают значимые изменения функциональной организации той или иной территории. Для оценки таких изменений производится математическое вычисление разницы между вегетационными индексами, рассчитанными для двух временных снимков инструментами ГИС (рис. 4). Значения менее $-0,35$ свидетельствуют о значительном сни-

жении биомассы. Такие изменения характерны для массовых вырубок деревьев. Анализ изменений вегетационного индекса дает оценку динамики развития урбанизации. В Петрозаводске наибольшие изменения выявлены для зон застройки. Значения разницы индексов более $0,35$ свидетельствуют об увеличении доли растительности. Это возможно за счет прироста молодых деревьев, искусственных насаждений, а также снижения негативного воздействия среды.

Применение зональной статистики позволяет рассчитать средние значения таких изменений в пределах функционально-ландшафтных зон. Полученные модели могут использоваться на стадии ТГЭМ «контроль» в рамках геоэкологического мониторинга. Здесь возможна фиксация изменений, происходящих как в течение длительного времени, так и краткосрочно. Так, например, микрорайон Древлянка до 2009 г. не испытывал значимых изменений растительности, однако в последнее время здесь наблюдается уменьшение зеленой массы (рис. 5).

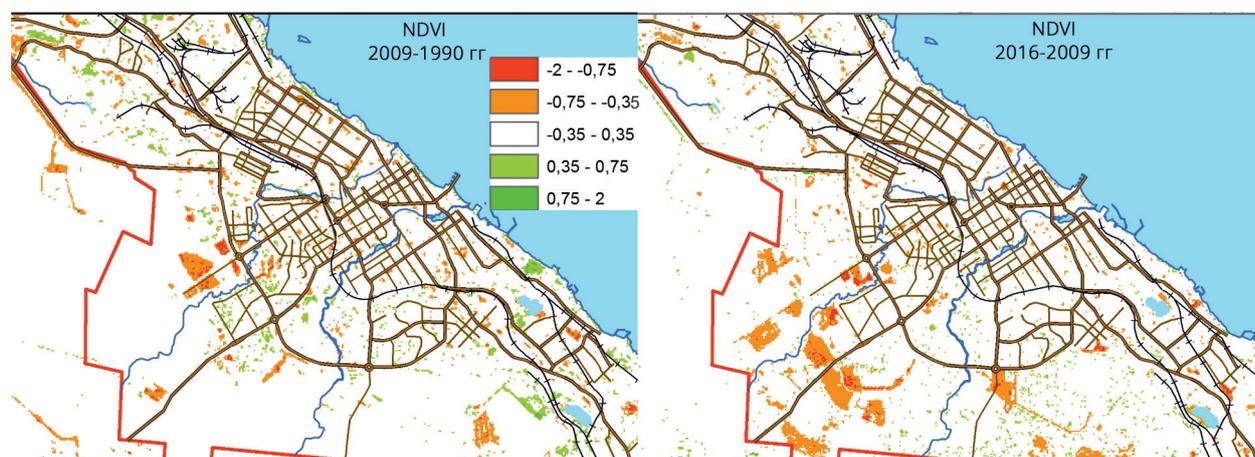


Рис. 4. Модели изменения вегетационного индекса за периоды 1990-2009 гг. и 2009-2016 гг.

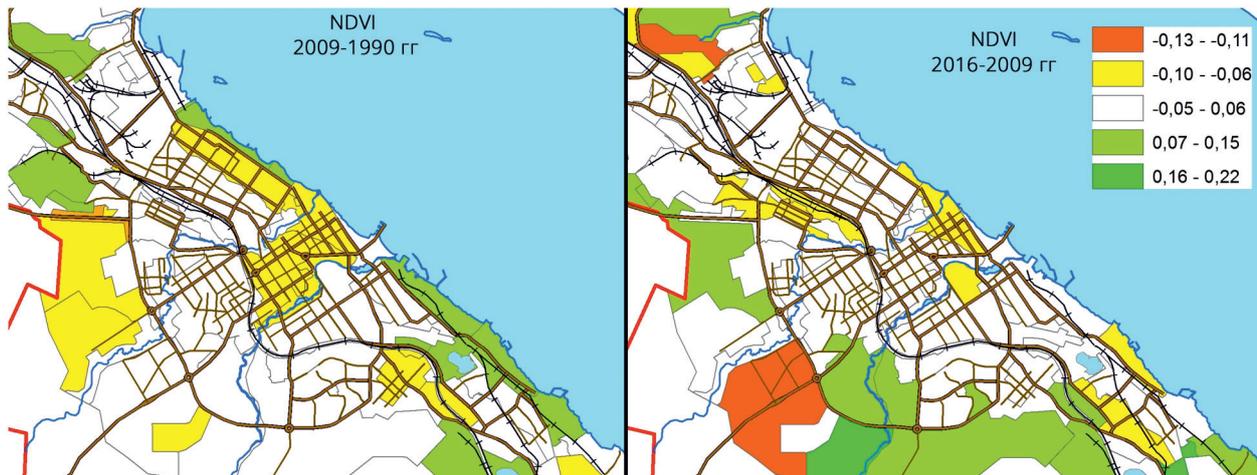


Рис. 5. Оценка среднего изменения NDVI по функционально-ландшафтным зонам

Здесь это связано с застройкой территории и вырубкой лесных массивов.

Создание интерполяционных эколого-геохимических моделей. Основная геохимическая информация, заложенная в атрибутивных таблицах, визуализируется в виде тематических слоев, отражающих пространственное распределение содержания конкретных химических элементов, а также уровня трансформации (загрязнения) компонентов природной среды, на основе различных показателей. Модели уровней трансформации компонентов природной среды создаются методом интерполяции по данным геохимического опробования. Интерполяция данных представляет собой создание новых графических слоев – поверхностей, на основе атрибутивной информации начальных слоев. Инструменты «Обратные взвешенные расстояния» (ОВР) (Inverse Distance Weighted) и «Естественная окрестность» (Natural Neighbor) являются простейшими инструментами интерполяции и наиболее подходят для задачи пространственного моделирования в рамках решаемых геоэкологических задач заданного масштаба. Эти инструменты производят оценку значений поверхности для каждой ячейки с помощью значений ближайших точек и расстояния до них.

Так, для Петрозаводска, по геохимическим данным 2011 г. созданы модели распределения в почвах тяжелых металлов, As на основе сравнения их концентраций с ОДК, ПДК в снежном покрове, почвах, донных осадках (рис. 6).

Интегральная оценка загрязнения почвенного покрова визуализирована на основе показателя экологической опасности (ПЭО) [7]. ПЭО учитывает степень опасности всех исследуемых элементов через весовые коэффициенты, вводимые для каждого элемента, и представляет собой средневзвешенное значение коэффициентов концентраций

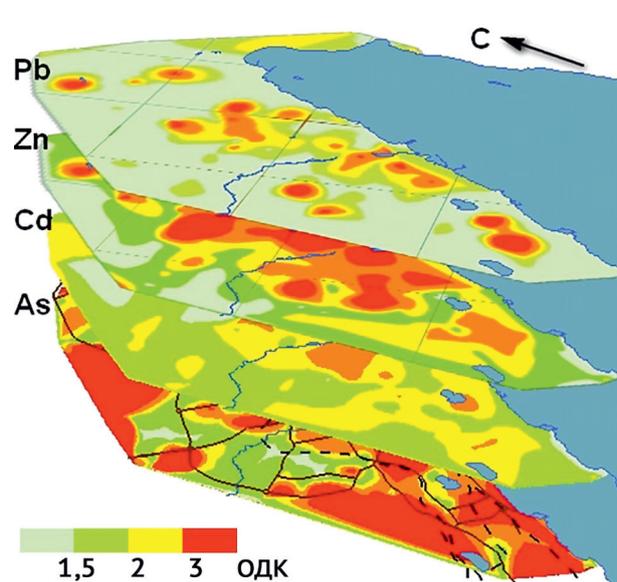


Рис. 6. Модели уровня загрязнения почв элементами 1-го класса опасности по превышению ОДК

загрязняющих элементов. На основе выделенных функционально-ландшафтных зон проведена оценка уровня трансформации почвенного покрова. Выявлено, что значительная территория города характеризуется низким и средним уровнем изменений. Однако в зонах повышенной техногенной нагрузки промышленного и транспортного типа значения показателя экологической опасности достигают высокого уровня (рис. 7).

Дальнейшее развитие системы ТГЭМ осуществляется за счет данных геоэкологического мониторинга (ГЭМ). Мониторинговые исследования предполагают значительное накопление как атрибутивной, так и картографической информации. В связи с этим базы данных создаются с возможностью

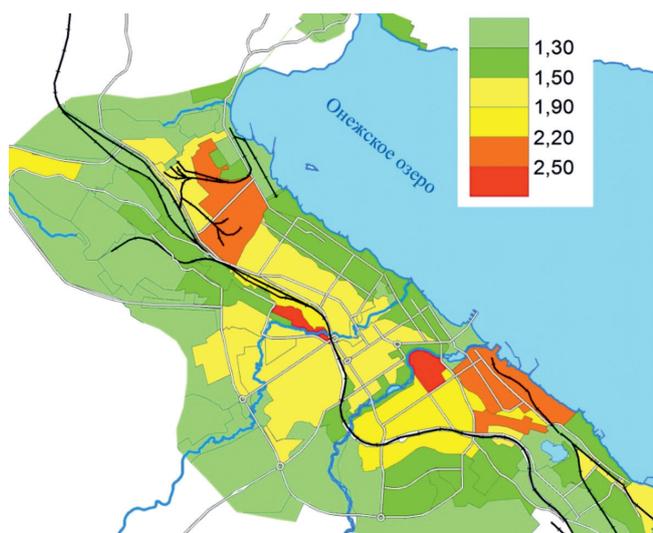


Рис. 7. Трансформация почвенного покрова г. Петрозаводска по ПЭО

временной и пространственной оценок информации. Выделяется несколько ожидаемых типов обновления информации:

- оперативное – до нескольких часов;
- краткосрочное – до квартала;
- долгосрочное – до 1 года;
- постоянное – более 1 года.

На основе получаемых данных разрабатываются геоинформационные блоки постановки и реализации природоохранных мероприятий с возможностью отражения стадий их выполнения.

Важным продолжением разработки инструментария ТГЭМ является создание веб-ГИС муниципального уровня, посредством которой возможно предоставление доступа к данным, аккумулированным в системе широкому кругу заинтересованных лиц без необходимости использования ими специализированного программного обеспечения. Функционал веб-ГИС позволяет отображать результаты геоэкологического мониторинга в виде веб-карт, управлять способом визуализации данных, определять политики доступа к данным для различных групп пользователей, организовывать данные в виде геосервисов. Кроме того, веб-ГИС предоставляет возможности для оперативного внесения в базу данных ГЭМ результатов наблюдательной сети, редактирования, поиска и анализа имеющейся атрибутивной информации. По сути, веб-ГИС является реализацией функции «единого окна» системы ТГЭМ для специалистов органов управления, научных и природоохранных организаций города.

Таким образом, основными внутренними данными ГИС являются базовые цифровые карты и цифровые модели. Совместное использование картографической и пространственной баз данных по-

зволяет систематизировано накапливать информацию, а также осуществлять создание нового материала. Эффективное применение ГИС, учитывающих геоэкологическую составляющую, возможно при объединении разнородной информации в единую пространственную базу геоданных, которая является ее важнейшим структурным элементом и ключевым звеном.

Ключевые слова: геоэкологический менеджмент, геоэкологические исследования, мониторинг, геоинформационные системы, базы данных, урбанизированные территории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барлиани И.Я. Возможности использования гистехнологий в системе планирования и управления территорией // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 6, № 1. – С. 247-250.
2. Дзюба О.Ф. Палиноиндикация качества окружающей среды. – СПб. : Недра, 2006. – 198 с.
3. Коркина Е.А., Талынёва О.Ю. ГИС как инструмент для выявления и анализа влияния техногенных и антропогенных факторов на природные ландшафты // Экологический мониторинг и биоразнообразие. – 2013. – № 1. – С. 129-132.
4. Косинова, И.И., Базарский О.В., Козинцев С.Н. Методика геоэкологической биоиндикации георисков техногенно-трансформированных территорий // Геориск. – 2012. – № 3. – С. 22-25.
5. Косинова И.И., Крутских Н.В., Лаврова Н.Б. Эколого-геохимическая оценка урбанизированных территорий на примере г. Петрозаводска // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2011. – № 2. – С. 204-211.
6. Крутских Н.В., Косинова И.И. Задачи и принципы территориального геоэкологического менеджмента урбанизированных территорий // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. – 2016. – № 2. – С. 141-146.
7. Крутских Н.В., Косинова И.И. Методика оценки трансформации природной среды по результатам эколого-геохимических исследований (на примере г. Петрозаводск) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. – 2014. – № 3. – С. 95-97.
8. Лукашев О.В., Жуковская Н.В. Ретроспективная оценка загрязнения почв и растительности г. Витебска тяжелыми металлами // Природные ресурсы. – 2006. – № 4. – С. 52-58.
9. Мелехова О.П. Биологический контроль окружающей среды: биоиндикация и биотестирование. – М. : Академия, 2007. – 288 с.
10. Ревич Б.А., Саг Ю.Е., Смирнова Р.С., Сорокина Е.П. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами. – М. : ИМГРЭ, 1982.