

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

*Ф.Н. Лисецкий, А.В. Свиридова, В.И. Соловьев*

*(Белгородский государственный университет, г. Белгород)*

*В статье показаны перспективы использования ГИС-технологий при исследовании экологической ситуации в городах. Предложены варианты разработки экологических карт на основе различных подходов: эколого-биологического и математического моделирования. Создание тематических карт позволит оценить уровень экологической опасности в урбоэкосистемах, создавая информационную основу для выработки управленческих решений.*

*In article prospects of use GIS-technologies are shown at research of an ecological situation in cities. Variants of development of ecological cards on the basis of various approaches are offered: ecologo-biological and mathematical modelling. Creation of thematic cards will allow to estimate a level of ecological danger in urboecosystems, creating an information basis for development of administrative decisions.*

## **Введение**

В городах наряду с развитой индустрией комфорта обострились проблемы качества среды обитания человека. Оставшиеся в урбанизированных системах фрагментированные природные экосистемы не способны компенсировать негативное воздействие антропогенных факторов, а реально принимаемые административные меры лишь частично сдерживают рост агрессивного воздействия бытовых, транспортных и промышленных отходов на среду обитания городского жителя. Таким образом, для крупных городов проблема загрязнения воздушной среды выбросами от автотранспорта и промышленных предприятий в последние годы стала наиболее актуальной.

Для принятия эффективных мер по снижению экологических рисков необходима не только количественная оценка негативного воздействия на окружающую среду, но и качественная с последующей визуализацией полученных результатов мониторинга в наглядной и доступной форме. Мощнейшим катализатором принятия разнообразных управленческих решений, касающихся всех сторон жизни города, является эколого-географическое изучение городских территорий [1]. Анализ научных работ (Курбатова А.С., Баранникова Ю.А. и др.) по проблемам экологии городской среды показал, что до настоящего времени экологическая информация практически не интегрирована в процесс принятия градостроительных решений.

Наиболее удобными и мощными инструментами для обработки данных, имеющих как пространственную, так и семантическую привязку, являются различные геоинформационные системы (ГИС). Программное обеспечение ГИС развивается на протяжении нескольких лет. С появлением космических спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого разрешения и постоянным совершенствованием ГИС стало возможным решать насущные задачи обновления и поддержания в актуальном состоянии практически всего масштабного ряда картографических данных [3].

### **Объекты и методы исследования**

Цель нашей работы заключалась в использовании ГИС-технологий при проведении комплексного экологического мониторинга на городских землях. Существует множество программных приложений на базе ГИС, адаптированных под решение экологических задач. В своей работе мы применяли следующие программные средства: *БелГИС*, *MapInfo*, *Surfer*, *Карта 2000*. Выбор в пользу этих программ был обусловлен следующим:

1. Программный модуль *БелГИС* отличается простотой и удобством процесса векторизации, а также предоставляет возможность наложения табличной информации из базы данных на карту.
2. Программное средство *Mapinfo* имеет возможность регистрации и отображения растровых карт в форматах: .gif, .jpg, .tiff, .pcx., bmp, .tga, .bil, .sid, .pgn, .wmf, .psd, а также импорт графики: DXF, DWG, ARC/INFO, ESRI SHAPE, Atlas GIS, Intergraph/MicroStation DGN, ASCII (.mif, .mmi, .mbi). *Mapinfo* поддерживает сферические проекции и позволяет автоматическое построение тематических карт.
3. Программный продукт *Surfer* – инструмент построения трехмерных моделей, в котором удобно представлена технология создания цифровых моделей рельефа.
4. ГИС *Карта 2000* предоставляет пользователю мощное средство разработки прикладных задач *Gis ToolKit*, позволяющее создать свою собственную ГИС, применяя различные языки программирования высокого уровня.

В качестве объекта исследования был выбран город Белгород – административный центр Белгородской области, площадью 15,31 тыс. га и численностью населения 344,2 тыс. человек (по данным на 2005 г.). По данным статистики, основные источники загрязнения атмосферы г. Белгорода – автомобильный транспорт (75 % и более) и предприятия стройиндустрии (22-27 %) - ЗАО «Белгородский цемент», ОАО «Стройматериалы». Валовые выбросы загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосферу от стационарных источников за 2005 г. составили 11,7 тыс. т, что на 3,5 % выше уровня 2004 г. На конец 2005 г. наличие транспортных средств составило 77731 единиц (из них 63755 легковых автомобилей). Несложно посчитать, что на 1000 жителей города приходится примерно 175,5 легковых автомобилей, что на 4 % больше по сравнению с 2004 г. На основе данных статистики можно говорить о тенденции возрастания негативной нагрузки на экосистему города в целом.

Для получения информации об объекте мониторинга используются различные промышленные приборы, основанные на разных физико-химических принципах действия: газоанализаторы, газоаналитические комплексы, дымомеры и др. В частности, контроль загрязнения атмосферы в г. Белгороде осуществляется специализированной лабораторией Белгородского центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды на четырех стационарных постах наблюдения, расположенных в 4-х условно разделенных районах города (центральная часть города, западная часть, спальный район, восточный промышленный р-н), и проводится по двенадцати ингредиентам: взвешенные вещества (пыль), растворимые сульфаты, диоксид серы, оксид углерода, диоксид и оксид азота, фенол, аммиак, формальдегид, хлористый водород, бенз(а)пирен и серная кислота. Однако, в связи с постоянно увеличивающейся техногенной нагрузкой в последние годы количество стационарных постов недостаточно. С целью усиления контроля и расширения системы экологического мониторинга за качеством атмосферного воздуха государственной экологической инспекцией Белгородской области была приобретена мобильная лаборатория «Скат», позволяющая получать своевременную и достоверную информацию о состоянии воздушного бассейна города в напряженных зонах [4]. Проблема, однако, состоит в том, что значения концентраций ЗВ (и их пространственное распределение), несмотря на возможности вышеуказанных станций и лабораторий, остаются, в общем-то, неизвестными. Даже если в городе имеются посты мониторинга атмосферы, они дают только очень ограниченную информацию. Кроме того, подобные посты расположены неравномерно по всей территории города, а без комплексного мониторинга загрязнения городской среды участки рационального размещения вышеуказанных станций определить достоверно не представляется возможным.

На основании вышесказанного, предлагается провести комплексный мониторинг урбоэкосистемы с помощью экологического моделирования с применением ГИС-технологий, позволяющий разрабатывать эколого-географические карты городской среды. Совмещение полученных результатов исследования с цифровой картой города дает возможность оценить уровень экологической опасности рассматриваемой территории с целью дальнейшего контроля этих участков с помощью мобильной лаборатории «Скат».

В период с 2001 г. по 2006 г. были проведены полевые исследования территории города Белгорода, организованные по разработанному нами алгоритму оценки исследуемой территории. Методическую основу анализа урбоэкосистем составляли следующие подходы: эколого-биологический и ГИС-технологии пространственного анализа и моделирования.

Использовали следующие методы исследований: биоиндикационные и химико-аналитические, методы статистической и алгоритмической обработки данных исследований, методы ландшафтно-экологического анализа, методы тематического картографирования, методы математического моделирования.

В научной работе была проведена интегральная оценка качества экологической ситуации городской среды, включающая в себя составление изолинейных карт на основе данных биоиндикации, отображающих зоны высокой экологической напряженности, и построения оверлеев полей концентраций ЗВ в полученных зонах, применяя методы математического моделирования территориального распространения ЗВ.

**Первый этап** исследований предполагал организацию эколого-биологического подхода. Выбранные эколого-биологические показатели отражают неспецифические отклики биологических систем на разнообразные виды антропогенного влияния. Это

позволяет рассматривать их в качестве индикаторов интегрального действия антропогенных факторов.

Для оценки состояния различных компонентов городской среды в качестве групп биоиндикаторов выступали как низшие растения (сообщества эпифитных лишайников), так и высшие (травянистый покров и древесная растительность).

Описание высшей растительности проводили по составленному бланку на 19 ключевых участках, включавшему описания древостоя, подроста, травяного покрова, а также проективное покрытие мхов и лишайников. Кроме того, было отобрано 107 почвенных образцов и собрано около 2875 листьев одуванчика. Выявляя изменения характеристик у растительных объектов, можно судить о загрязнении среды и прогнозировать опасность экологических угроз для человека.

Для оценки качества атмосферного воздуха на территории г. Белгорода были использованы методы лишеноиндикации [5]. Было обследовано 556 стволов деревьев. Лишайники являются наиболее чувствительным индикатором изменения среды, поэтому они первыми деградируют или погибают при ухудшении экологической ситуации. При анализе воздействия стационарного источника выбросов ЗВ ЗАО «Белгородский цемент» на высшую растительность (древостой и травянистый покров) использовали разработанную нами шкалу балльной оценки экологической обстановки исследуемой территории, на основе которой была построена карта в программе *БелГИС*.

Оценка состояния почв городских территорий была проведена посредством анализа морфогенетических изменений в растениях с помощью метода флуктуирующей асимметрии (ФА) листовой пластинки одуванчика лекарственного (*Taraxacum officinale* Wigg). С целью создания базы данных, содержащей сведения по экологическим характеристикам почв и растительности, точки отбора растительных и почвенных образцов были пространственно скоординированы с помощью *GPS*-

технологий. Для снижения погрешности измерений и облегчения обработки данных полевого исследования нами впервые применен картографический модуль *MapProj* программы *БелГИС*. Была проведена векторизация и автоматически определены площади право- и левосторонних частей листовой пластинки. Оценку стабильности развития одуванчика лекарственного проводили по следующим двум морфологическим признакам: площадь и периметр левой и правой сторон листа, по результатам данных которых было произведено качественное разбиение территории города на зоны экологического благополучия и риска. Для определения оптимальных мест расположения контрольно-измерительной аппаратуры в выявленных местах повышенного экологического риска предполагается спрогнозировать картину пространственного распределения негативных факторов, а именно, построить оверлей полей концентраций ЗВ, приведших к морфогенетическим изменениям флоры. Здесь математическое моделирование может оказать неоценимую помощь, так как позволяет рассматривать различные варианты поведения изучаемой системы.

**Второй этап** исследований предполагает построение оверлея полей концентраций ЗВ в районе крупной автомагистрали города, расположенной в выявленной на первом этапе исследований зоне предриска – проспекте Богдана Хмельницкого. На данном этапе использовали ГИС *Карта 2000*, и набор компонентов *Gis ToolKit*, с помощью которых, в системе визуального объектно-ориентированного программирования *Delphi 7.0* было разработано оригинальное ГИС–приложение, реализующее алгоритм расчета значений концентраций ЗВ в изучаемом районе и визуализацию результатов расчета на цифровой карте города. Для оценки концентраций компонентов выбросов транспорта в атмосферу использовали модели расчета турбулентной диффузии разной степени сложности, учитывающие влияние на рассеивание загрязнений различных природно-климатических факторов, а также

рельефа местности, застройки территории, характеристик подстилающей поверхности и процессов, происходящих в атмосфере.

В конечном виде уравнение атмосферной диффузии имеет следующий вид:

$$\frac{dq}{dt} + u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa_x \frac{\partial q}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa_y \frac{\partial q}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa_z \frac{\partial q}{\partial z} \right) - \alpha q, \quad (1)$$

где  $q$  - среднее значение (математическое ожидание) концентрации примеси;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  - соответственно, координаты в пространстве с данной концентрацией;  $\kappa_x$ ,  $\kappa_y$ ,  $\kappa_z$  - составляющие коэффициента турбулентного обмена;  $u$ ,  $v$ ,  $w$  - компоненты средней скорости перемещения примеси;  $\alpha$  - коэффициент, характеризующий источники и стоки примеси (коэффициент превращения вещества) [6].

Таким образом, в общем виде, задача прогноза загрязнения воздуха математически может быть определена как решение при определенных начальных и граничных условиях дифференциального уравнения (1).

На начальном этапе разработки системы мониторинга использовали упрощенную модель вычисления концентраций ЗВ, основанную на расчетном решении уравнения (1). Данная модель учитывает влияние следующих факторов на распространение вредных веществ (ВВ) в зоне дыхания людей (2,0 м): выброс веществ от источника загрязнения в единицу времени (кг/час), пространственные координаты, направление и скорость ветра, температура окружающей среды (К), начальный подъем примесей (м), а также изменение коэффициентов турбулентной диффузии с изменением некоторых вышеперечисленных параметров.

Однако отсутствие в данной модели учета застройки территории существенно влияет на область ее применения. Острая экологическая ситуация возникает также в замкнутых объемах дворовых территорий: в условиях стесненной застройки образуются так называемые застойные зоны, где в безветренную погоду практически отсутствует вынужденный ветровой перенос примесей ЗВ и рассеивание выбросов

осуществляется за счет естественной конвекции. Поэтому, перспективным становится повышение адекватности модели, что позволяет производить учет застройки территории на конечное распространение полей концентраций ЗВ на рассматриваемом участке мониторинга.

Как пример реализации алгоритма, рассмотрен участок дороги длиной в 1000 м - линейный источник загрязнений - и примыкающий к нему перекресток, как точечный источник. Входными параметрами разработанного ГИС-приложения для расчета концентраций ВВ в узлах сетки реперных отметок, наложенной на электронную карту, прилегающей к дороге и перекрестку территории, являются выбросы от источников загрязнения в единицу времени, рассчитанные по методике Министерства транспорта и окружающей среды 1996 года [7]. Согласно данной методике, мощность выбросов в окрестностях автомагистралей зависит от интенсивности движения автотранспорта, типа машин и скорости их движения.

Таким образом, полученные в ходе экспериментальных замеров характеристики транспортных потоков и рассчитанные мощности выбросов ЗВ являются исходными данными для расчета полей концентраций ЗВ. В дальнейшем данные натурных экспериментов могут дополняться и обновляться посредством применения контрольно-измерительной аппаратуры, установленной на автомагистралях, в режиме реального времени.

Реперные точки, расположенные в узлах сетки, помимо метрической информации – координат положения на карте, содержат также семантическую характеристику, представляющую собой рассчитанные по математической модели значения концентраций вредных примесей в атмосферном воздухе. Далее, на основе полученных данных производится растровое представление расчетной оценки приземной концентрации ВВ на участке городской территории (1000x300 м) с учетом созданной шкалы концентраций. Растровая модель местности получена

путем анализа семантических свойств реперных точек, градации их по заданным уровням шкалы концентраций и последующим заполнением элементов раstra соответствующим цветом. Самым высоким значениям концентраций ( $>50 \cdot 10^{-6}$  кг/м<sup>3</sup>) присвоен красный цвет отображения, нулевому значению – сине-зеленый.

### **Результаты и обсуждение**

По данным лишеноиндикации в пределах г. Белгорода были выделены три зоны с различным состоянием приземного слоя атмосферы: зона высокой экологической напряженности (ЗВЭН), зона средней экологической напряженности (ЗСЭН), зона низкой экологической напряженности (ЗНЭН). ЗВЭН включает микрорайоны города, в структуре загрязнителей которых преобладают бенз(а)пирен, окись серы, пыль и другие ВВ. Эта зона, включая автомагистраль ул. Б. Хмельницкого, связывает территории северо-западного и юго-восточного промышленных узлов. Сочетание крупных загрязняющих предприятий, автомагистралей и жилых кварталов усложняет экологическую ситуацию. Следствием этого является низкий потенциал самоочищения и усугубление неблагоприятных последствий для растительности. Результаты данных исследований представлены на рис. 1 (карта выполнена с использованием программного продукта *БелГИС*).

Результаты оценки состояния высшей растительности северо-западной промышленной зоны г. Белгорода, показали, что экологическая ситуация вблизи промышленного объекта ЗАО «Белгородский цемент» крайне неблагоприятная. Естественная растительность изменена на 50-80 %. Древесные породы в неудовлетворительном состоянии. Наблюдается снижение густоты кроны на 30-40%. Полученные результаты свидетельствуют о том, что необходима оптимизация структуры древесных насаждений не только в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ), но и за ее пределами (рис. 2).

С учетом вредных выбросов предприятия и физико-географических условий был разработан рекомендуемый ассортимент газо-пылеустойчивых растений для оздоровления территории, подверженной техногенному прессу.

По данным ФА листа как критерия качества городских почв с использованием программного средства *Surfer8* построена карта изолиний, анализ которой позволил выделить на территории г. Белгорода зоны экологического комфорта и экологического кризиса. Сопоставляя карту экологической ситуации с картой функционального зонирования территории города, установлено, что наиболее неблагоприятная обстановка складывается в производственных зонах, где предприятия относятся I, II, III, IV, и V классу вредности (северо-западный промышленный узел и юго-восточная часть района Крейды, где расположены такие предприятия, как Абразивный завод, ОАО «Белмясо», ЗАО «ЗМК»). Зона экологического риска и кризиса выходит за границы СЗЗ предприятий и захватывает жилую застройку и зону рекреационного назначения. В предрисковую зону входят крупные автомагистрали города (ул. Б. Хмельницкого, просп. Ватутина, часть ул. Губкина - в сторону автотрассы федерального значения Белгород-Харьков). Архиерейская роща, расположенная в понижении рельефа, вытянута вдоль вышеуказанного участка трассы по ул. Губкина и является своеобразным накопителем ЗВ. Она входит в зоны риска и предриска. К зонам экологического комфорта можно отнести территории города, находящиеся на его периферии. Это следующие районы: западный (с. Стрелецкое), юго-восточный (Старый город), юго-восточный (урочище «Сосновый бор»), юго-западный (пос. Дубовое) (рис. 3).

Для получения пространственного распределения полей концентраций ЗВ в районе центральной автомагистрали города и ее пересечения с улицей, соединяющей жилой сектор с северо-западным промышленным районом (просп. Б. Хмельницкого и ул. Мичурина), было использовано разработанное ГИС-приложение, позволившее, на

основании полученных математических моделей, произвести оценку значений концентраций ЗВ на участке площадью 0,5 км<sup>2</sup> в сети реперных отметок с шагом расчета 4 метра (30000 расчетных точек) и последующую визуализацию результатов моделирования на цифровой карте города. Анализ полученных оверлеев позволил выявить места максимальной концентрации ЗВ. Превышение значений ПДК в 2 и более раз наблюдаются в районе перекрестка транспортных потоков (рис. 4). В первую очередь, это обусловлено резким увеличением объема выхлопных газов при нестационарном режиме работы двигателя в периоды торможения/разгона и ожидания, а также общим скоплением автомобилей на перекрестке при работе запрещающего сигнала светофора. Вместе с тем, по мере удаления от перекрестка, расчетные концентрации ЗВ резко убывают и уже на расстоянии несколько десятков метров не превышают ПДК.

Таким образом, размещение контрольно-измерительной аппаратуры должно производиться на основе учета нахождения мест максимальных значений расчетных концентраций ЗВ, а именно, в окрестности перекрёстков на расстоянии нескольких метров от обочины дороги. В свою очередь, данные замеров значений концентраций ЗВ, произведенных контрольно-измерительными постами, и переданные на центральный диспетчерский пункт, позволят осуществлять оперативный контроль и, если потребуется, коррекцию результатов расчетной оценки, выполненной с применением ГИС-приложения.

Анализ результатов моделирования, проведенного с применением более адекватной математической модели, показал, что застройка территории создает препятствия для естественного рассеивания выхлопных газов, тем самым, влияя на максимальные расчетные значения концентраций ЗВ, в случае ее расположения непосредственно вблизи источника выбросов (рис. 5).

Следует отметить, что применяемые модели имеют универсальный характер, и привязка их к условиям конкретных объектов и районов осуществляется, как правило, на уровне входной информации (значения мощностей выбросов ЗВ, параметров застройки прилегающей территории, климатических факторов). Это значит, что для практического использования моделей требуется создание специальной информационной базы, содержащей сведения о географических и климатических условиях исследуемых объектов.

### **Выводы**

1. Предложена система реализации комплексного экологического мониторинга с использованием ГИС-технологий.
  2. Представлены методы оценки экологического состояния урбоэкосистемы: биоиндикационные – интегральная оценка качества городской среды и методы математического моделирования – пространственное распространение полей концентраций ЗВ.
  3. Построены карты экологического зонирования городской территории по состоянию различных компонентов городской среды. Для зон повышенного экологического риска были получены оверлеи пространственного распределения полей концентраций ЗВ, приведших к морфогенетическим изменениям флоры.
  4. Даны рекомендации по снижению негативного воздействия ЗВ. Предложены места наиболее рационального размещения контрольно-измерительной аппаратуры.
- Таким образом, можно заключить, что отображение полученного раstra полей концентраций ЗВ и карт зонирования территории по экологической комфортности совместно с цифровой картой города позволяет выделить зоны особой опасности для населения и разработать предложения по ее снижению, особенно, в связи с реализацией новой градостроительной политики в г. Белгороде, предполагающей значительное расширение городской территории под индивидуальное жилищное

строительство. Создаваемая база данных мониторинговой оценки исследуемой территории позволит хранить и обновлять вносимые пространственные данные, а также автоматизировано представлять изменения экологической ситуации во времени.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-05-96306.

*Контактный телефон: (4722) 30-11-76*

*E-mail: [liset@bsu.edu.ru](mailto:liset@bsu.edu.ru)*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров В.З., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н. Эколого-географическое картографирование городов. – М.: Научный мир, 2002.
2. Курбатова А.С., Баранникова Ю.А., Павлов Н.В. Роль экологического картографирования в решении градостроительных задач // Информационный бюллетень. – 2005. – № 4.
3. Современные космические данные дистанционного зондирования – основа построения единой системы пространственных данных // Информационный бюллетень ГИС-ассоциации. – 2006. – № 1.
4. Состояние окружающей среды и использование природных ресурсов Белгородской области в 2005 году: справочное пособие / Под ред. С.В. Лукина. – Белгород: БелГУ, 2006.
5. Удянская Е.А., Свиридова А.В. Влияние городской среды на состояние лишенофлоры // Сборник материалов VI Международной научно-практической конференции «Биосферосовместимые и средозащитные технологии при взаимодействии человека с окружающей природой». – Пенза, 2001.
6. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнений. – Л.: Гидрометеиздат, 1985.
7. Методика расчетов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ автотранспортом на городских магистралях. – М.: Мин-во транспорта РФ, 1996.

*Рис.1. Зонирование территории города Белгорода по экологической напряженности (автор Е.А. Удянская)*

*Рис.2. Оценка экологического состояния северо-западной промышленной зоны г. Белгорода, полученная на основе диагностики высших растений*

*Рис. 3. Зонирование территории г. Белгорода по показателю ФА листовой пластинки*

*Рис. 4. Растровые представления расчетных оценок приземной концентрации ВВ, полученные с применением упрощенной математической модели*

*Рис. 5. Растровые представления расчетных оценок приземной концентрации ВВ, полученные с применением математической модели, учитывающей застройку территории*