

На правах рукописи



МЫНЦОВ ИЛЬЯ АНАТОЛЬЕВИЧ

Выделение репрезентативных показателей на основе  
графоаналитической модели при геоинформационном моделировании  
экологического состояния территорий

Специальность 25.00.35

«Геоинформатика»

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

Москва 2012

Работа выполнена в Московском Государственном Университете Геодезии и Картографии (МИИГАиК) на кафедре Вычислительной техники и автоматизированной обработки аэрокосмической информации.

Научный руководитель: кандидат технических наук  
Чабан Людмила Николаевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Троицкий Владимир Иванович  
кандидат технических наук  
Некрасов Виктор Владимирович

Ведущая организация: Государственный научно-внедренческий  
центр геоинформационных систем и  
технологий

Защита состоится «16» февраля 2012 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва К-64, Гороховский пер., д. 4, МИИГАиК, зал заседания Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Государственного Университета Геодезии и Картографии.

Автореферат разослан «16» января 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Климков Ю.М.

### **Актуальность темы**

В последнее время постоянно ухудшающаяся экологическая ситуация на планете вызывает все больший интерес. Наиболее эффективным способом оценки экологического состояния экосистем является использование для этой задачи возможностей, которые предоставляют геоинформационные системы (ГИС). ГИС позволяют хранить, обрабатывать, отображать в электронном виде информацию по состоянию региона. Они объединяют возможности картографических систем с возможностями баз данных, благодаря чему открываются широкие перспективы исследования интенсивно развивающихся территорий. Экологические качества природной среды определяются множеством различных показателей состояния, влияющих на общую экологическую ситуацию территории. При этом ни один из показателей состояния не может полностью отражать экологическую ситуацию, поскольку его экологический эффект зависит от устойчивости экосистем к этим типам воздействий. Также существует вероятность взаимной компенсации некоторых измеряемых показателей. Экологическая оценка природной среды должна быть комплексной, учитывающей всю совокупность воздействующих факторов. Для получения адекватной комплексной оценки природной среды необходимо отобрать из всего множества возможных показателей относительно небольшое число наиболее важных, чтобы исключить чрезмерную детализацию полученных результатов расчета интегрального показателя.

Существующие математические методы анализа экологических данных основаны на гипотезах об определенных свойствах наборов данных, поэтому применимы только для решения частных задач и не решают задачу отбора наиболее информативных показателей в целом. В связи с этим в настоящее время являются актуальными задачи разработки новых методов анализа имеющихся экологических данных на исследуемую территорию. Особенно важна разработка методики выделения репрезентативных показателей состояния и факторов воздействия, их дальнейшего анализа и ранжирования в геоинформационных системах на основе данных по показателям состояния природных ресурсов. Выделение репрезентативных показателей возможно при использовании методики, основанной на применении графоаналитической модели.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования является геоинформационное моделирование комплексных показателей экологического состояния интенсивно развивающихся территорий.

Предметом исследования является методика выделения репрезентативных показателей на основе графоаналитической модели при комплексной оценке и картографировании экологического состояния территорий средствами геоинформационных систем.

### **Цели и задачи**

Целью данной диссертационной работы является разработка и апробация методики ранжирования показателей состояния по значимости их влияния на экологическое состояние исследуемой территории.

Для реализации цели диссертационной работы должны быть решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих геоинформационных систем, предназначенных для комплексной оценки экологического состояния территорий.

2. Определены принципы отбора репрезентативных показателей состояния интенсивно развивающихся территорий.

3. Проанализированы существующие математические методы, применяющиеся для анализа и отбора репрезентативных показателей.

4. Проведен анализ возможности применения графовых методов для отбора показателей для комплексной оценки экологического состояния территорий в геоинформационных системах.

5. Разработана методика отбора наиболее репрезентативных показателей состояния и факторов воздействия на основе логически обоснованного графоаналитического метода.

6. Выполнено апробирование методики на реальных данных.

### **Научная новизна**

1. Впервые использована графоаналитическая модель взаимосвязи между факторами антропогенного воздействия и их последствиями для отбора репрезентативных экологических показателей.

2. Автоматизирована методика ранжирования репрезентативных показателей состояния природных ресурсов и факторов воздействия при геоинформационном моделировании экологического состояния территорий.

### **Практическая значимость**

1. Предложенная методика, основанная на методах анализа графов, при добавлении в стандартные возможности геоинформационных систем существенно сокращает затраты на комплексный анализ экологических данных, что особенно важно при разработке экологических ГИС на крупные промышленные регионы.

2. Полученные результаты позволяют выработать рекомендации по сокращению загрязняющих выбросов и улучшению экологической ситуации интенсивно развивающихся территорий.

3. Материалы диссертации являются отправной точкой для последующих разработок в области геоинформационных систем на основе графоаналитических методов.

### **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа посвящена разработке методики выделения репрезентативных показателей на основе графоаналитической модели при геоинформационном моделировании экологического состояния территорий. Полученные результаты соответствуют пункту 6 «Математические методы, математическое, информационное, лингвистическое и программное обеспечение для ГИС» паспорта специальности 25.00.35 «Геоинформатика», в рамках которой и предлагается к защите данная работа.

### **Основные результаты, выносимые на защиту**

- Методика анализа и ранжирования экологических показателей загрязнения экосистем с использованием графоаналитической модели при геоинформационном моделировании экологического состояния территорий.
- Алгоритм выделения репрезентативных показателей состояния природных ресурсов, основанный на анализе модулярности графов.
- Результаты ранжирования показателей загрязнения и соответствующих им антропогенных факторов на территории Подольского района Московской области.

### **Апробация работы**

Апробация производилась в рамках темы «Разработка методологии геоинформационного моделирования для оценки и прогноза природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий» для Подольского района Московской области.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 64-ой научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК в 2009 году и на 66-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК в 2011 году.

### **Публикации**

Основные результаты, полученные в данной работе, представлены в трех научных публикациях, а том числе одна статья в журнале, вошедшем в перечень ВАК РФ.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа объемом 137 страниц состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 6 таблиц и 16 рисунков.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, а также сформулированы цели и задачи исследования.

**Первая глава** диссертационной работы посвящена вопросу оценки экологического состояния интенсивно развивающихся территорий. В связи со все возрастающими масштабами индустриализации природная среда подвергается значительному негативному антропогенному воздействию, которое вызывает ее деградацию, а зачастую и полное разрушение. Мощным инструментом для оценки экологического состояния территорий являются современные геоинформационные системы экологического назначения. В настоящее время в экологическом мониторинге преобладают ГИС локального типа, ориентированные на специфику конкретной небольшой территории, т.к. разработка ГИС регионального уровня осложнена необходимостью анализировать очень большое количество показателей и соответствующих им

факторов антропогенного воздействия. Проблема оценки степени воздействия негативных факторов на экологическое состояние экосистем является актуальной и пока не решенной задачей. Помимо оценки запаса природных ресурсов также необходимо учитывать и безопасность их потребления. В связи с этим возникает необходимость введения интегрального (комплексного) показателя состояния природных ресурсов, учитывающего совокупность наиболее репрезентативных показателей. Возможностью учета всего комплекса частных показателей экологического состояния природных ресурсов обладает интегральный показатель – природно-ресурсный потенциал (ПРП) интенсивно развивающихся территорий.

Природно-ресурсный потенциал – обобщенный показатель, адекватно отражающий тенденции динамических изменений природной среды региона в ходе ее естественной эволюции и под воздействием внешних (природно-климатических и антропогенных) факторов.

Всесторонняя характеристика ПРП требует учета огромного количества показателей, однако для получения корректных результатов экологической классификации необходимо отобрать из всего множества возможных показателей относительно небольшое число наиболее важных. Принципы такого отбора основываются на экологической неравнозначности различных показателей состояния интенсивно развивающихся территорий и на существовании взаимных связей между ними.

В задаче расчета обобщенного показателя состояния природных ресурсов возникает необходимость обработки и анализа различных частных показателей. В геоинформационной системе можно визуально отобразить на карте как ареалы распространения отдельных частных показателей состояния, так и всего комплекса показателей одновременно. При большом числе показателей состояния отображение всей совокупности будет визуально ненаглядным, не даст целостного представления о ситуации в регионе, а комплексный показатель состояния экосистем будет слишком дробным, что затруднит анализ полученных результатов. При высоком уровне детализации картографического отображения интегрального показателя

достоверное обобщение полученных результатов затруднительно. Также следует учитывать, что если комплексная оценка определяется на основе объединения большого количества показателей состояния, имеющих различное распределение, то в результате велика вероятность получить равномерное распределение, при котором невозможно найти наиболее рациональные пути улучшения экологической ситуации, поскольку неясно, каков вклад каждого из факторов в показатели состояния экосистем. Для комплексной оценки экологического состояния территории необходимо использовать некоторый набор показателей, наиболее точно ее характеризующий. При этом для более точных расчетов экологического потенциала территории необходимо использовать методику выделения наиболее репрезентативных показателей состояния, что невозможно без знаний физической природы последних. Для этого целесообразным представляется проведение анализа возможных показателей состояния интенсивно развивающихся территорий.

Показатели состояния природных ресурсов являются следствием воздействия природных и антропогенных факторов на экосистему. В главе рассмотрены возможные факторы воздействия на экосистему и показатели состояния территории, влияющие на общую экологическую оценку региона.

Показатели состояния природных ресурсов определяются для отдельных составляющих экосистемы: почвы, водных объектов, атмосферного воздуха и растительности. Необходимо учитывать, что загрязняющие вещества имеют тенденцию перемещаться из одной части экосистемы в другую, накапливаться в некоторых из них. Большое количество выбросов вредных веществ происходит в атмосферу и поверхностные воды, откуда они попадают в почву, где происходит их накопление и аккумуляция. Основная масса токсичных техногенных веществ поступает из нее в растительность и живые организмы. Способность почвы к самоочищению ограничена и зависит от деятельности микроорганизмов, воздушного и водного режимов. Показателями состояния почв являются показатели ее деградации.

Деградация проявляется в виде нарушения почвенного профиля, ухудшения физических свойств почв, происходит эрозия, уплотнение



почвенного слоя и заболачивание территорий. Основными показателями состояния являются показатели степени эрозии, плотности почвенного слоя, уровень заболоченности. При ухудшении химических свойств почв, истощении запасов питательных элементов, засолении, загрязнении тяжелыми металлами и пестицидами основными загрязнителями являются выбросы промышленных объектов, свалки и внесение удобрений для нужд сельского хозяйства. Основными показателями в данном случае являются содержание вредных веществ в почвах, степень засоления территорий, химический состав почв.

Для выделения потенциально наиболее опасных показателей загрязнения необходимо брать данные по наиболее устойчивым во времени и пространстве компонентам экосистем. Поэтому именно показатели загрязнения почвы можно использовать для определения наиболее общих тенденций развития экологической ситуации в исследуемом регионе.

**Вторая глава** диссертационной работы посвящена анализу различных математических методов анализа данных, которые могут использоваться в задачах геоинформационного моделирования. Рассмотрены корреляционный и регрессионный анализы, метод главных компонент и метод экспертных оценок с точки зрения возможности их применения для задачи выделения наиболее репрезентативных показателей состояния интенсивно развивающихся территорий.

Ни один из рассмотренных методов анализа данных не может обеспечить решение поставленной в работе задачи выбора наиболее репрезентативных показателей состояния природных ресурсов. При использовании регрессионного и корреляционного анализа из-за наличия достаточно большого количества показателей состояния и факторов воздействия, связанных между собой, объем получаемой информации слишком велик для последующего анализа. Метод главных компонент также не способен решить эту задачу. В первую очередь, это связано с тем, что линейное преобразование не всегда оставляет максимум полезной информации. Также важно, что максимальная дисперсия данных необязательно несет наибольшее количество информации. А в экспертной оценке

всегда высока вероятность субъективного результата, особенно при анализе большого объема данных и недостатке квалифицированных экспертов.

Поскольку показатели состояния экосистем формируются на интенсивно развивающихся территориях под воздействием множества разнообразных факторов, то связи между ними можно рассматривать как связи между субъектами, обусловленные некими неизвестными аналитику закономерностями. Статистическое исследование всех взаимосвязей между факторами воздействия и показателями состояния требует больших трудовых и материальных затрат. А также, в силу имеющихся ограничений каждого метода, применение их может не дать адекватный реальности результат.

Исходя из вышесказанного, для решения задачи выбора наиболее репрезентативных показателей состояния целесообразным представляется применение методов теории графов.

Для задачи выделения наиболее репрезентативных показателей состояния и факторов воздействия рассматривались методы разбиения графа на группы, а также методы поиска наиболее значимых ребер графа, авторами которых являются Гирван, Ньюман, Клаусет и Мур. Эти методы разработаны для анализа зависимостей в графе социальных сетей. Аналогия между социальными сетями и показателями экологического состояния территории основывается на том, что связь между двумя показателями существует в случае, когда они порождаются одним фактором (в случае социальных сетей фактор – это определенная социальная тема). Методы обработки и анализа графов позволяют разбивать его на группы, руководствуясь связями внутри графа, но в силу специфики данных методов, в явном виде неприменимы для поиска наиболее значимых вершин в графе, а значит и для поставленной в диссертационной работе задачи.

Анализ рассмотренных методов анализа графов показал, что:

◆ Для отбора наиболее значимых вершин в графе необходимо использование метода, осуществляющего добавление ребер к несвязному (пустому) графу.

◆ Граф должен быть взвешенным, причем вес ребер должен напрямую зависеть от концентрации показателей состояния.

◆ Применение методики, основанной на любом из рассмотренных графовых методов, даже в случае наличия большого количества исходных данных, будет занимать приемлемый интервал времени.

**В третьей главе** диссертационной работы описана теоретическая разработка методики выделения наиболее репрезентативных показателей на основе имеющихся в ГИС данных, а также проведен анализ методов прогнозирования.

Все данные по показателям не только имеют различные единицы измерения, но и зачастую различную степень давности. В самом лучшем случае геоинформационная система, используемая для анализа и обработки информации, должна включать актуальные данные по показателям состояния интенсивно развивающихся территорий. Однако иногда приходится обрабатывать устаревшие данные, т.к. не на все территории проводится регулярный мониторинг природных ресурсов.

Если для одной территории за одно и то же время существует несколько проб, то необходимо найти усредненное значение. Наилучшим способом является проведение площадной интерполяции, функции, доступной практически во всех современных геоинформационных системах. После получения средних значений показателя на исследуемый регион необходимо уточнить эти данные на момент времени, для которого ведутся текущие исследования. Чаще всего это делается при помощи прогнозирования имеющихся данных.

В главе проведен анализ методов прогнозирования показателей состояния на основе имеющихся проб. Среди методов прогнозирования широкое распространение получили следующие методы экстраполяции: метод наименьших квадратов, метод наименьших квадратов с весами, метод экспоненциального сглаживания, метод авторегрессии. Проведен сравнительный анализ этих методов, выявлены недостатки и преимущества каждого из них в решении широкого спектра задач.

Было принято решение использовать метод наименьших квадратов, который всегда дает приемлемый результат. А при наличии большого количества взятых проб можно перейти к методу экспоненциального сглаживания для получения более точного результата.

Составив прогнозные функции, была получена полная таблица значений показателей состояния на текущий момент времени. Следующим шагом является вычисление нормированной концентрации относительно ее предельно допустимого значения, рассчитывающейся по формуле

$$k_{\text{норм. показателя}} = \frac{f(t)}{ПДК_{\text{показателя}}}, \quad (1)$$

где  $t$  – расчетный год.

Также следует отметить, что для работы методики необходимы данные о воздействии факторов на различные экосистемы, результатом которого являются определенные показатели состояния. Была составлена таблица взаимосвязей факторов воздействия на экосистему и показателей состояния, при этом любой показатель мог формироваться несколькими факторами. От этой информации напрямую зависит не только анализ и ранжирование показателей, но и выработка итоговых рекомендаций по улучшению экологической ситуации в регионе.

Рассмотрим метод построения графа.

Пусть есть множество из  $n$  показателей ( $P = \{p_k\}, k=1, \dots, n$ ) и множество из  $m$  факторов ( $F = \{f_i\}, i=1, \dots, m$ ), влияющих на их значение.

Составим граф, вершинами которого будут различные показатели, а ребра будут существовать в случае, если существует отличная от нуля вероятность, что оба показателя формируются одним и тем же фактором.

Для расчета веса ребра следует определить следующие важные понятия:

общее загрязнение выбранными показателями состояния, равное произведению нормированных коэффициентов загрязнения  $k_1 k_2$ ;

коэффициент потенциальной экологической оценки состояния территории по выбранным показателям состояния, который изменяется между значениями 0 и 100%, что соответствует экстремальной и идеальной оценке. Именно этот коэффициент предлагается использовать в качестве веса ребра:

$$\text{вес ребра}_{1,2} = K_{\text{ПЭО1,2}} = \frac{1}{1+k_1k_2}. \quad (2)$$

Однако если есть необходимость расчета наиболее значимых факторов отдельно для каждого типа экосистем, а также значимость выбранных показателей для каждой из них, то предлагается умножить предложенную формулу на коэффициент устойчивости экосистем исследуемой территории к воздействию выбранных показателей состояния:

$$K_{\text{уст1,2}} = \sum_n (S_i \frac{k_{\text{зн.1i}} + k_{\text{зн.2i}}}{2}),$$

где  $k_{\text{зн.}i}$  – коэффициент значимости показателя  $n$  для типа экосистемы  $i$ ,  $S_i$  – относительная площадь типа экосистемы  $i$  (в % от площади исследуемого региона).

В случае получения пустого или полного графа применение разработанной методики анализа не даст реального результата. Единственным критерием оценки будет нормированный относительно ПДК коэффициент загрязнения. Но чаще всего получается объединение перекрывающихся полных графов, тогда возможно применение разработанной методики для анализа графа и выделения наиболее репрезентативных показателей состояния.

Пусть  $A_{vw}$  – элемент матрицы смежности.  $A_{vw}=0$ , если вершины не соединены. Предположим, что граф разделен на группы так, что  $v$  принадлежит группе  $C_v$ . Доля ребер, которые лежат внутри группы, т.е. соединяют точки, которые обе лежат в одной группе, равна

$$\frac{\sum_{vw} A_{vw} \delta(c_v, c_w)}{\sum_{vw} A_{vw}} = \frac{1}{2m} \sum_{vw} A_{vw} \delta(c_v, c_w),$$

где  $\delta(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если } i = j \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases}$ ,

а  $m = \frac{1}{2} \sum_{vw} A_{vw}$  - количество ребер в графе.

Степень вершины  $v$  равна количеству ребер, связанных с данной вершиной:

$$k_v = \sum_w A_{vw}.$$

Вероятность существования ребра между  $v$  и  $w$  равна  $\frac{k_v k_w}{2m}$  для случайного графа.

Теперь можно получить оценку качества разбиения графа на группы, которая названа модулярностью.

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{vw} \left[ A_{vw} - \frac{k_v k_w}{2m} \right] \delta(c_v, c_w) = \sum_i (e_{ii} - a_i^2),$$

где  $e_{ij} = \frac{1}{2m} \sum_{vw} A_{vw} \delta(c_v, i) \delta(c_w, j)$  - все ребра, связывающие группы  $i$  и  $j$ ,

и  $a_i = \frac{1}{2m} \sum_v k_v \delta(c_v, i)$  - все вершины, смежные с группой  $i$ .

$Q = 0$  показывает, что это ребро случайно. Все  $Q$ , отличные от 0, показывают отличие от гипотезы случайности и влияют на структуру групп внутри графа. Важность ребра в графе будет тем выше, чем ближе значение  $Q$  к максимуму, то есть к единице.

Для того чтобы ускорить расчет, будем использовать формулу изменения модулярности –  $\Delta Q$ , она определяет наименее случайное ребро из всех возможных. Таким образом, получаем возможность выделить наиболее важные ребра итеративным методом, запоминая минимум информации на каждом шаге.

$$\Delta Q = \begin{cases} \frac{1}{2m} - \frac{k_v k_w}{(2m)^2}, & \text{если } v \text{ и } w \text{ соединены} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3)$$

$$a_i = \frac{k_i}{2m}.$$

На первом шаге рассчитывается  $\Delta Q$ , а в дальнейшем пересчитываем только смежные элементы по следующему принципу:

$$\cdot \text{ Если } k \text{ соединена и с } i \text{ и с } j, \text{ то } \Delta Q'_{jk} = \Delta Q_{ik} + \Delta Q_{jk} \quad (4)$$

$$\cdot \text{ Если } k \text{ соединена с } i, \text{ но не с } j, \text{ то } \Delta Q'_{jk} = \Delta Q_{ik} - 2a_j a_k \quad (5)$$

$$\cdot \text{ Если } k \text{ соединена с } j, \text{ но не с } i, \text{ то } \Delta Q'_{jk} = \Delta Q_{jk} - 2a_i a_k \quad (6)$$

$$\cdot a'_j = a_j + a_i. \quad (7)$$

Общий алгоритм отбора наиболее репрезентативных показателей состояния природных ресурсов интенсивно развивающихся территорий представлен на рис.1.

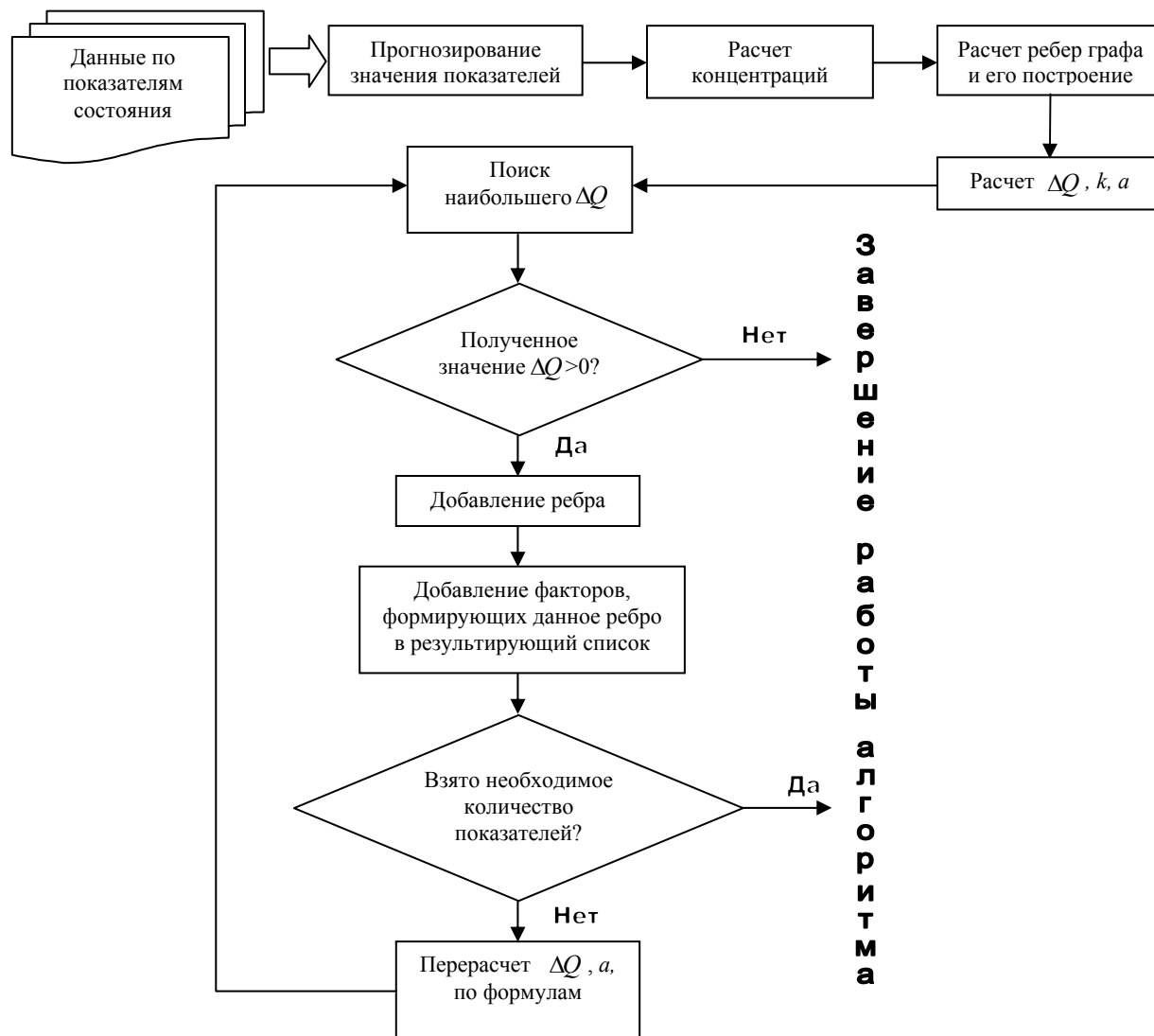


Рис. 1. Алгоритм методики выделения наиболее репрезентативных показателей состояния

Результатом работы алгоритма будет некоторый набор значимых вершин графа, соответствующих наиболее репрезентативным показателям состояния, оказывающим наибольшее влияние на природно-ресурсный потенциал интенсивно развивающихся территорий.

Поиск наиболее репрезентативных показателей очень важен для определения экологического состояния региона. Для восстановления состояния природных ресурсов региона необходимо воздействовать не на нарушенную экосистему, а стремиться к нейтрализации источников загрязнения, то есть факторов, оказывающих негативное влияние на территорию. Определение этих факторов не может быть проведено со 100% вероятностью, так как каждый

показатель может формироваться несколькими факторами, также как один фактор может формировать множество различных показателей.

В предложенной методике существует возможность определения списка факторов, оказывающих наибольшее воздействие на исследуемый регион. Для этого при каждом добавлении ребра с наибольшим  $\Delta Q$  ведется учет всех возможных факторов, связывающих выбранные показатели. Таким образом, после окончания работы алгоритма выделения наиболее репрезентативных показателей также получается список, содержащий возможные негативные факторы воздействия на экосистему. Причем факторы будут упоминаться в списке то количество раз, сколько ребер из полученного подграфа каждый из них может формировать. Чем чаще каждый фактор будет упоминаться в этом списке, тем больше вероятность его негативного воздействия на природно-ресурсный потенциал исследуемой территории.

Разработанный алгоритм может быть также использован при разработке рекомендаций для рационального природопользования и улучшения экологического состояния интенсивно развивающихся территорий.

Рассмотрим общую схему разработанной методики отбора наиболее репрезентативных показателей на примере ее использования при геоинформационном моделировании экологического состояния территорий. Данная методика может использоваться автономно, но учет природного потенциала экосистем дает более репрезентативную карту экологического состояния территории. Кроме того, в этом случае можно учесть и вредоносность показателей для каждого отдельного типа экосистем.

Исходными данными при выделении репрезентативных показателей при комплексной оценке и картографировании экологического состояния территории средствами ГИС являются картографические материалы, данные по экологическому состоянию исследуемого региона, нормативные документы и справочные материалы в области природопользования. Все картографические данные в ГИС в итоге представляют собой следующие слои: почвенная карта, геоботаническая карта, карта административно-хозяйственного деления



территории, эколого-геохимическая карта. Объединение слоев почвенной и геоботанической карт дает слой, содержащий минимальные контуры – экосистемы.

1. Экспорт данных из ГИС из атрибутивной таблицы к слою эколого-геохимической карты, содержащему информацию об исследуемой территории по имеющимся на ней загрязнениям, во внешнюю БД. Также переносится информация со слоя, содержащего минимальные контуры экосистем.

2. Разработанная в БД процедура в первую очередь подключается к необходимым для расчета таблицам в БД, включающим значения загрязнения на исследуемую территорию и предельно допустимые концентрации этих веществ, а также площади минимальных контуров экосистем и их тип.

3. По имеющимся данным производится расчет нормированных коэффициентов концентрации показателей состояния по формуле (1).

4. Далее производится построение графа на основе этих коэффициентов, данных по отношению суммарных площадей природных и полуприродных экосистем на исследуемой территории, а также таблицы данных по воздействию негативных факторов на экосистемы.

5. После создания исходного графа производится расчет суммы всех ребер в графе.

6. Затем рассчитывается модулярность каждого ребра по формуле (3).

7. Выбираются вершины, ребро между которыми имеет наибольшую модулярность.

8. Показатели состояния, соответствующие этим вершинам, добавляются в результирующую группу, а также все факторы, формирующие оба выбранных показателя, добавляются в список наиболее вероятных факторов.

9. Производится пересчет модулярности необходимых ребер и суммы весов всех ребер в графе.

10. Производится повторение шагов 7-9 до тех пор, пока не будет набрана необходимая группа показателей.

11. Полученные списки наиболее репрезентативных показателей состояния природных ресурсов и факторов воздействия записываются в соответствующие поля таблицы БД для расчета на их основе природно-ресурсного потенциала исследуемой территории.

12. Импорт результирующей информации в ГИС и последующее ее картографическое отображение.

**В четвертой главе** диссертационной работы проведена апробация предложенной методики на основе полученных данных по загрязнению Подольского района Московской области.

Апробация выполнялась с использованием ArcView GIS и созданной при выполнении темы «Разработка методологии геоинформационного моделирования для оценки и прогноза природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий» БД в MS Access.

Были собраны картографические и табличные данные по показателям состояния природных ресурсов Подольского района, нормативные документы по предельно допустимым концентрациям загрязняющих веществ в почве и атмосферном воздухе, подготовлен актуальный список промышленных предприятий и организаций сельскохозяйственной отрасли Подольского района Московской области. Все исходные данные по показателям состояния природных ресурсов были занесены в геоинформационную систему ArcView в атрибутивную информацию к слою карты, отображающему площадь Подольского района Московской области. Промышленные предприятия были нанесены точечными объектами на карту региона (рис. 2).

В таблицы в программно-инструментальной среде MS Access были занесены данные по ПДК загрязняющих веществ и взаимосвязи между факторами воздействия и показателями состояния природных ресурсов.

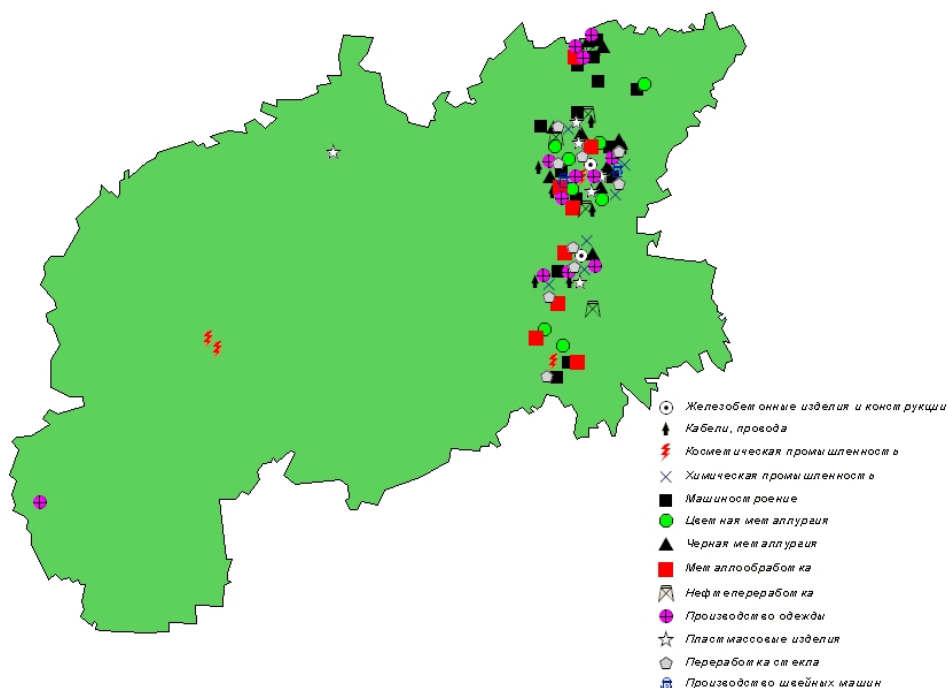


Рис. 2. Карта факторов антропогенного воздействия

Вначале выполняется прогнозирование значений загрязнений на заданный момент времени. Далее осуществляется расчет концентрации всех показателей по формуле:

$$k_{\text{норм.показателя}} = \frac{\text{спрогнозированное значение}}{\text{ПДК}_{\text{показателя}}}$$

Рассчитав таким образом концентрацию для всех имеющихся по Подольскому району Московской области показателей состояния, формируется таблица 1.

	Pb	Cu	Zn	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	Пест.	Cd	As	Ni	Cr	Hg
Значение показателя	0.5	0.3	1.2	0.2	0.3	0.5	1.3	0.3	1.4	0.2	1.3	1	0.2

Таблица 1. Концентрации показателей состояния в Подольском районе Московской области

Для корректной работы методики необходимы данные по взаимосвязи показателей состояния и формирующих их факторов воздействия (таблица 2). Эти взаимосвязи определяются на основе анализа материалов экологических служб.

Если фактор формирует показатель, то в таблице записана единица, иначе ячейка оставлена пустой.

	Pb	Cu	Zn	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	Пест.	Cd	As	Ni	Cr	Hg
выбросы транспорта	1					1	1						
черная металлургия	1	1							1		1		1
цветная металлургия		1	1	1					1		1		1
легкая пром.			1	1	1	1	1		1		1	1	
химическая пром.					1		1	1			1	1	1
свалки	1	1	1					1					1
сельское хозяйство								1	1	1			
ТЭС	1						1						1

Таблица 2. Факторы воздействия, формирующие выбранные показатели состояния

Создание графа производится на основе полученных в предыдущем пункте данных. Вершинами графа являются показатели состояния. Ребра между ними существуют, если оба показателя формируются одним и тем же фактором.

По итогам расчета весов по формуле (2) сформирована таблица 3.

	Pb	Cu	Zn	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	Пест.	Cd	As	Ni	Cr	Hg
Pb		0,8695	0,625		0,8695		0,606	0,8695	0,588		0,606		0,909
Cu	0,8695		0,7355					0,9175	0,704		0,7195		0,9435
Zn	0,625	0,7355		0,8065	0,7355		0,3905	0,7355	0,373		0,3905	0,4545	0,8065
H <sub>2</sub> S			0,8065		0,9435	0,909	0,7935	0,9435	0,7815		0,7935	0,8335	0,9615
SO <sub>2</sub>	0,8695		0,7355	0,9435			0,7195		0,704		0,7195	0,769	0,9435
NO <sub>2</sub>				0,909			0,606	0,8695	0,588	0,909	0,606	0,6665	0,909
CO <sub>2</sub>	0,606		0,3905	0,7935	0,7195	0,606		0,7195	0,3545		0,3715	0,435	0,7935
Пест.	0,8695	0,9175	0,7355	0,9435		0,8695	0,7195		0,704	0,9435	0,7195	0,769	0,9435
Cd	0,588	0,704	0,373	0,7815	0,704	0,588	0,3545	0,704		0,7815	0,3545	0,4165	0,7815
As						0,909		0,9435	0,7815				
Ni	0,606	0,7195	0,3905	0,7935	0,7195	0,606	0,3715	0,7195	0,3545			0,435	0,7935
Cr			0,4545	0,8335	0,769	0,6665	0,435	0,769	0,4165		0,435		0,8335
Hg	0,909	0,9435	0,8065	0,9615	0,9435	0,909	0,7935	0,9435	0,7815		0,7935	0,8335	

Таблица 3. Вес ребер полученного графа

Ненаправленный граф дает симметричную относительно главной диагонали таблицу. В дальнейшем верхняя половина будет опускаться для большей наглядности. Далее применяется разработанный алгоритм анализа графа. Выполняется расчет  $\Delta Q$  для имеющихся ребер по формуле:

$$\Delta Q = \frac{1}{2m} - \frac{k_v k_w}{(2m)^2}.$$

В таблице 4 выделено наибольшее значение изменения модулярности, которое используется в первую очередь. Это ребро связывает показатели Ni и Cd. Оба этих показателя имеют единственный фактор, который может их формировать – цветная металлургия. Следовательно, на данном этапе происходит добавление единицы к фактору цветной металлургии в таблицу возможных действующих на регион факторов.

При слиянии двух выбранных вершин в одну группу значения  $\Delta Q$  обновляется по формулам (4), (5), (6) и (7). После перерасчета таблицы  $\Delta Q$  происходит дальнейший поиск наибольшего значения. Это продолжается до тех пор, пока максимальное из  $\Delta Q$  не станет отрицательным или же пока не будет добавлено необходимое количество показателей. В рамках конкретной задачи было принято решение остановиться на 6-и показателях. На рисунке представлен

итоговый граф (рис.3). Яркость ребер свидетельствует о порядке их добавления, от более темных к более светлым.

	Pb	Cu	Zn	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	CO	Пест.	Cd	As	Ni	Cr	Hg
Pb													
Cu	0,175												
Zn	0,498	0,411											
H <sub>2</sub> S			0,423										
SO <sub>2</sub>	0,230		0,456	0,132									
NO <sub>2</sub>				0,174									
CO	0,528		0,697	0,455	0,487	0,518							
Пест.	0,261	0,151	0,481	0,166		0,247	0,511						
Cd	0,603	0,526	0,758	0,536	0,566	0,594	0,779	0,588					
As						0,074		0,062	0,465				
Ni	0,560	0,479	0,723	0,490	0,521	0,550	0,746	0,544	<b>0,802</b>				
Cr			0,621	0,353	0,389	0,423	0,647	0,416	0,712		0,675		
Hg	0,206	0,091	0,436	0,106	0,150	0,191	0,468	0,183	0,548		0,502	0,368	

Таблица 4. Расчет модулярности ребер графа

Следующим шагом является выделение наиболее репрезентативных факторов, а также их ранжирование по полученным из графа данным.

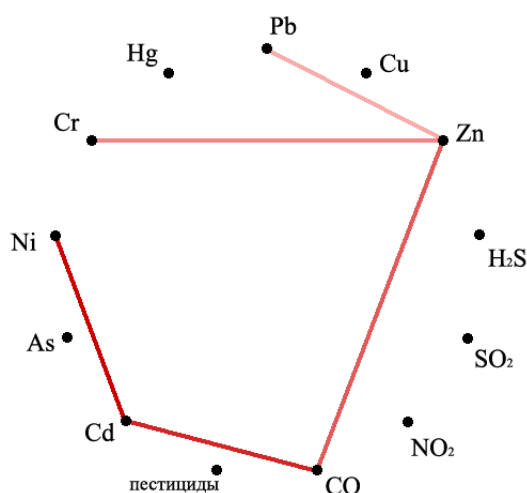


Рис. 3. Итоговый граф выбранных репрезентативных показателей

При каждом добавлении ребра к графу идет поиск и учет всех возможных факторов, формирующих данное ребро. После завершения работы методики был сформирован список факторов воздействия. Чем чаще фактор добавлялся в список, тем больше вероятность реального воздействия данного фактора на исследуемый регион.

Исходя из полученной таблицы ранжирования факторов (Таблица 5), можно сделать вывод о том, что на территории Подольского района Московской области основными негативными показателями состояния среды региона стали показатели, формирующиеся под воздействием антропогенных

факторов – легкой и химической промышленности, а также цветной и черной металлургии. Также необходимо обратить внимание на наличие в регионе свалок, выбросов автотранспорта и ТЭС.

<b>Легкая промышленность</b>	<b>4</b>
<b>Цветная металлургия</b>	<b>2</b>
<b>Химическая промышленность</b>	<b>2</b>
<b>Черная металлургия</b>	<b>2</b>
Тепловые электростанции	1
Транспорт	1
Свалки	1

Таблица 5. Ранжирование факторов воздействия на Подольский район Московской области

При изучении промышленных предприятий региона были найдены Подольский аккумуляторный завод, Краснопахорский завод изделий из металлических порошков, «Крестовский пушномеховой комплекс», ОАО «Машиностроительный завод «ЗиО-Подольск», ОАО «Подольский завод цветных металлов» и ОАО «Подольский химико-металлургический завод». Вероятнее всего, именно эти предприятия оказывают наибольшее воздействие на экологическое состояние региона. Однако также не следует исключать возможность загрязнения под влиянием промышленных предприятий соседних административных единиц.

Ранжирование факторов имеет большое значение прежде всего для моделирования динамики природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий с учетом экологической ситуации. Ранжирование факторов, особенно при учете значимости отдельных показателей для каждого типа природопользования, позволяет строить более достоверные сценарии пространственно-временной динамики ПРП, а также использовать эти результаты для выработки наиболее рациональных стратегий природопользования.

Реализация разработанной методики анализа эколого-географической информации происходит посредством MS Access. Для написания необходимого скрипта использовался встроенный язык программирования Visual Basic.

Исходными данными для методики выделения наиболее репрезентативных показателей состояния и факторов воздействия в MS Access являются таблицы:

- Таблица «Экосистема», в которой содержится информация о минимальных контурах экосистем, их площадь, тип и другие свойства,

необходимые для расчета природно-ресурсного потенциала исследуемой территории. В эту же таблицу записывается итоговое значение ПРП.

- Таблица «Регион», в которой содержится информация о наличии различных загрязнений территории. Сюда же записываются наиболее репрезентативные показатели состояния природных ресурсов, а также ранжированные факторы воздействия.

- Таблица «Фактор-Показатель», в которой хранится информация о существующих зависимостях между факторами и показателями, полученная на основе анализа материалов экологических служб.

- Таблица «Показатели состояния», в которой хранится информация о ПДК загрязняющих веществ.

Скрипт запускается вместе с расчетом природно-ресурсного потенциала, также производящимся в базе данных MS Access. При этом значение ПРП будет основано именно на выделенных по разработанной методике наиболее репрезентативных показателях. Результат ранжирования факторов записывается в таблицу «Регион» для их последующего отображения в ГИС.

### **Основные результаты работы**

1. Показана необходимость использования комплексного (интегрального) показателя состояния природных ресурсов для оценки экологической ситуации интенсивно развивающихся территорий.

2. Проведен анализ использования геоинформационных систем для оценки экологического состояния интенсивно развивающихся территорий.

3. Дана оценка влияния факторов и показателей состояния на природно-ресурсный потенциал интенсивно развивающихся территорий.

4. Показана возможность использования методов анализа графов для выделения наиболее репрезентативных показателей состояния интенсивно развивающихся территорий.

5. Разработана общая методика отбора репрезентативных экологических показателей при геоинформационном моделировании природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий.

6. Проведена апробация предложенной методики на данных по Подольскому району Московской области. Получен ранжированный список факторов воздействия на экосистемы, который может быть использован в качестве рекомендаций по снижению загрязняющих выбросов в районе.

#### **Публикации по теме диссертации**

1. А.Г. Власова, И.А. Мынцов «Концепция базы данных для геоинформационного моделирования природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий». // В сб. материалов докладов XIII международной научно-практической конференции «Методы дистанционного зондирования и ГИС-технологии для оценки состояния окружающей среды, инвентаризации земель и объектов недвижимости: GEOINFOCAD-2010». Австрия, 2010, с. 3-4.

2. Чабан Л.Н., Власова А.Г., Мынцов И.А. Концепция и структура базы данных для геоинформационного моделирования природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий. // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011, № 4, с. 98-103.

3. Мынцов И.А., Власова А.Г. Выбор частных показателей для расчета природно-ресурсного потенциала на основе анализа модулярности графовой модели. // Приложение к журналу Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2011, № 4, с.62-64.

Подписано в печать 13.01.2012. Гарнитура Таймс  
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Объем 1,50 усл. печ. л.

Тираж 80 экз. Заказ №2 Цена договорная

Издательство МИИГАиК  
105064, Москва, Гороховский пер., 4