

*На правах рукописи*

**ФИЛИППОВА АННА АЛЕКСАНДРОВНА**



**УДК 622:502.3:681.3**

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ  
В ГОРНОПРОМЫШЛЕННОМ РЕГИОНЕ**

**Специальность 25.00.35 – «Геоинформатика»**

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

**Москва 2003**

Работа выполнена в Московском государственном горном университете.

Научный руководитель

доктор технических наук Шек Валерий Михайлович

Официальные оппоненты

профессор, доктор технических наук Соболев Андрей Игоревич,

доцент, кандидат технических наук Колыбанов Кирилл Юрьевич

Ведущая организация: Всероссийский научно-исследовательский институт химической технологии (ВНИИХТ МАТ РФ).

Защита состоится «15» октября 2003 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.128.08 при Московском государственном горном университете по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного горного университета.

Реферат разослан «15» сентября 2003 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
докт. техн. наук

В.М. Шек

2003-A  
14374

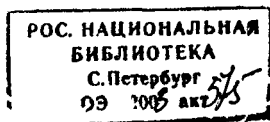
**Актуальность работы.** Согласно Закону РФ "Об охране окружающей природной среды" промышленные предприятия, в том числе горнодобывающие, стремятся привести свою производственно-хозяйственную деятельность к установленным нормативно-правовым и экологическим требованиям (ГОСТы 17.2.3.02-78, 17.1.3.13-86, 17.0.0.04-90 и др.). Для горной промышленности особенно актуален экологический мониторинг в связи со значительными выбросами вредных веществ от различных производственных источников. С целью избежания штрафных санкций, а также рационального использования средств на природоохранные мероприятия необходимо своевременно реагировать на неблагоприятные (аварийные) ситуации, связанные с загрязнением окружающей среды.

Исследования в этой области показали, что достоверность мониторинга напрямую зависит от качества оборудования для замера проб наличия, постов, станций наблюдения за метеопараметрами и количества последних. Расходы на контроль состояния природной среды вокруг каждого промышленного объекта весьма значительны. Поэтому разработка методов и средств расчетного, модельного определения экологической ситуации по сравнительно небольшому количеству фактически измеряемых параметров, несомненно, является актуальной научной и практической задачей.

**Цель исследования** заключается в разработке нового геоинформационного подхода к моделированию экологических ситуаций, позволяющего объединять на единой картографической основе разнородные модели и данные и исследовать изменчивость состояния природной среды в пространстве и времени.

**Задачи исследования:**

- анализ экологического мониторинга в горнопромышленном регионе с целью определения нового подхода к оценке состояния окружающей среды;



- разработка геоинформационного подхода к моделированию экологических ситуаций для решения задач контроля и управления экологическим состоянием природной среды;
- создание геоинформационных моделей и методов для моделирования выброса, переноса и накопления вредных веществ в горнопромышленном регионе;
- разработка объектно-ориентированного метода представления данных об изменчивости загрязнений в пространстве и времени в виде динамических ГИС-моделей зон загрязнения;
- апробация разработанных моделей и методов с использованием данных по Междуреченскому угледобывающему региону Кемеровской области.

**Идея работы** заключается в объединении ГИС-технологий и объектно-ориентированной методологии моделирования для создания имитационной модели распространения и накопления загрязнений. Такая модель позволяет учесть нестационарность выбросов вредных веществ, метеоусловий, характер подстилающей поверхности и дает возможность построения карт изменчивости загрязнений в пространстве и времени.

**Основные научные положения, разработанные соискателем, и их новизна:**

- разработан геоинформационный подход к моделированию экологических ситуаций, позволяющий объединять на единой картографической основе разнородные модели и данные с целью исследования и контроля состояния природной среды;
- на основе совокупности объектно-ориентированной методологии и технологий ГИС разработана открытая, масштабируемая в пространстве и времени имитационная модель распространения загрязнений, позволяющая проводить исследование изменчивости экологического состояния окружающей среды в пространстве и времени;

- предложен метод представления данных о загрязнении в виде динамических ГИС-моделей, который позволяет учесть нестационарность выбросов, метеоусловий и подстилающей поверхности;
- предложен методический подход к расчету концентраций загрязняющих веществ в атмосфере и на поверхности земли.

**Достоверность научных положений**, сформулированных в диссертации, подтверждается:

- корректным использованием нормативных методик расчета рассеяния, методов математической статистики и геомоделирования;
- положительными результатами апробации имитационной модели, построенной на основе разработанного автором геоинформационного подхода.

**Научная значимость работы** состоит в разработке нового геоинформационного подхода к моделированию экологических ситуаций, заключающегося в объединении на единой картографической основе разнородных моделей и данных с целью исследования изменчивости состояния природной среды в пространстве и времени.

**Методы исследований.** В работе использован комплекс методов исследований, включающий:

- системный анализ;
- объектно-ориентированную методологию разработки и моделирования сложных систем;
- методы теории вероятностей и математической статистики;
- методы пространственного анализа, хранения, преобразования, отображения и обработки пространственно-распределенных данных в ГИС.

**Практическая значимость работы** состоит:

- в разработке методики расчета приземных концентраций вредных веществ на базе ГИС-моделей зон загрязнения, позволяющей учесть динамику процесса распространения загрязнений;
- формировании системы электронных карт горнопромышленного региона как основы геомоделирования экологических ситуаций;

- создании программного обеспечения для функционирования имитационной модели распространения загрязнений на базе ГИС ArcView.

**Апробация работы.** Основное содержание работы и ее отдельные положения докладывались на научных симпозиумах «Неделя горняка» (г. Москва, 2001-2003 гг.), семинарах кафедры АСУ Московского государственного горного университета.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 7 печатных работах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Общий объем диссертации составляет 111 страниц, в том числе содержит 105 страниц основного текста, 22 рисунка, 12 таблиц. Список литературы включает 57 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В диссертации анализируются сложившиеся на текущий момент модели и методы моделирования экологических ситуаций в районе промышленных источников выбросов. Исследуются информационные технологии, использующиеся при моделировании.

В первой главе исследованы система экологического мониторинга в горнопромышленном регионе и технологии моделирования распространения загрязнений как одного из важных этапов мониторинга.

Хотя многие исследователи отмечают, что на всех этапах экологического мониторинга используются данные, которые имеют пространственную привязку, в большинстве пакетов прикладных программ, решающих экологические задачи, ГИС-компоненты используются лишь для отображения результатов модельных или мониторинговых исследований («Гарант-Универсал», «ЭОЛ-2000», ЕНПС). Этого недостаточно при современных требованиях к проведению мониторинга. Необходимо использовать интерактивную работу с тематическими картами: осуществление пространственных запросов и операций над

объектами карты, доступ к БД атрибутивной информации по свойствам объектов и другие.

Сложность описания процесса распространения загрязнений приводит к отсутствию единого подхода к моделированию. Существует множество слабо сочетаемых моделей, описывающих отдельные процессы: выброс, перенос, оседание примеси.

Такие модели рассчитаны в основном для однократного расчета концентраций примесей за период моделирования, в котором условия распространения загрязнения считаются стационарными. Нет возможности учесть при моделировании нестационарность выбросов (приходится использовать значения максимальных выбросов, что приводит к завышению получаемых концентраций, и, как следствие, большим штрафам за загрязнение окружающей среды или тратам лишних средств на проведение природоохранных мероприятий).

Форма выходных данных традиционных моделей - множество точек с координатами  $(x,y,z)$ , где  $x,y$  - координаты расчетной точки,  $z$  - значение концентрации примеси, неудобна для лица, принимающего решение, и затрудняет последующий анализ, сопоставление результатов моделирования, полученных в разных географических и временных условиях.

Автором сформулированы предпосылки разработки нового **геоинформационного подхода** к моделированию экологических ситуаций, который позволит проводить мониторинг не отдельных "компонент природной среды" (атмосфера, гидросфера, биосфера), а целых пространственных систем (геосистем), исследовать их функционирование, развитие под влиянием человеческой деятельности и т.д.

Под экологической ситуацией здесь понимается сочетание условий и обстоятельств, создающих то или иное распределение загрязнений от промышленных источников в пространстве и времени.

При геоинформационном подходе применим особый вид моделирования - пространственное или геомоделирование (*spatial model(l)ing, geo-model(l)ing*),

которое включает операции, аналогичные используемым в математико-картографическом моделировании и картографическом методе исследования.

Геомоделирование позволяет перейти от традиционного использования карт только как средства передачи мониторинговой информации к использованию карты как инструмента анализа, реконструкции и прогнозирования развития отдельных явлений, территорий, геосистем.

Во второй главе сформулированы и обоснованы основные этапы геоинформационного подхода:

1. Использовать модель данных ГИС при сборе, начальной обработке и хранении исходной картографической и статистической информации.
2. При анализе, обработке и хранении всех видов информации применять ее иерархическое структурирование и классификацию по пространственно-временным критериям.
3. Представить процесс распространения загрязнений в виде последовательности взаимосвязанных моделей-модулей на основе объектно-ориентированной методологии.
4. Использовать банк моделей как источник и хранилище моделей-модулей.
5. Применить аппарат имитационного моделирования и ГИС-технологии для исследования динамики процесса распространения загрязнений в пространстве и времени.
6. На базе имитационной модели с использованием пространственно-временного масштабирования формировать модели зон загрязнения.
7. Реализовать накопление моделей зон загрязнения в базе масштабированных данных для оценки и прогнозирования экологического состояния природной среды.

Обоснование указанных выше этапов проведено на примере имитационного моделирования распространения загрязнений в атмосфере горнопромышленного региона.

Исследования показали, что использование имитационного моделирования позволяет реализовать динамику экологических процессов, учесть, напри-



мер, нестационарность выбросов (и таким образом избежать неоправданного завышения значений концентраций и больших штрафов за загрязнение окружающей среды, трат лишних средств на проведение природоохранных мероприятий).

Разработка имитационной модели проведена с использованием объектно-ориентированной методологии, которая позволила реализовать свойства открытости, масштабируемости, совместимости с другими моделями.

При этом сама имитационная модель реализована в виде интегрированной ГИС, которая обеспечивает взаимодействие моделей-процессов («образование выброса», «перенос примеси», «оседание (накопление) примеси») и моделей-объектов, учитывает пространственно-временные факторы рассеяния и позволяет пополнять базы масштабированных данных (знаний) о предметной области.

Взаимосвязь процессов «образование выброса», «перенос примеси», «оседание (накопление) примеси» осуществлена с помощью объекта «промышленный выброс».

Объект «промышленный выброс» – это модельное представление воздушно-газовой смеси, образующейся в результате работы промышленного источника и содержащей набор примесей (веществ-загрязнителей) с исходными концентрациями, превышающими их фоновые значения,

Промышленный выброс характеризуется:

- объемом выбросов в единицу времени, т.е. мощностью источника;
- исходной концентрацией в выбросе основных загрязнителей, т.е. исходным составом;
- температурой выброса;
- типом источника (технологический процесс или рабочее место; отдельное предприятие или группа однотипных предприятий; группа разнотипных предприятий или отрасль).

Процесс образования выброса является нестационарным. Что подразумевает возможное непостоянство мощности источника выброса и исходного состава выброса за заданный интервал времени.

Чтобы перейти к нестационарной (точнее квазистационарной или периодической) модели, использована такая экспертная информация, как типичный временной график выброса.

Временной график выброса представляет собой зависимость мощности источника выброса от времени. При этом для каждого заданного интервала времени определено свое значение мощности и исходного состава выброса.

Эта информация позволила представить весь период моделирования в виде последовательности интервалов, в течение которых мощность источника и исходный состав выброса остаются постоянными.

В случае присутствия в выбросе веществ - загрязнителей, обладающих суммированным (аддитивным) действием, использовано понятие «группа суммации». Концентрация такой примеси равна сумме концентраций образующих ее веществ; ПДК «группы суммации» задана как сумма предельно допустимых значений концентраций каждого отдельного вещества.

Структура имитационной модели показана рис. 1.

Представление распространения загрязнений в виде взаимосвязанных моделей-модулей на основе объектно-ориентированной методологии (согласно третьему положению подхода) позволило снизить размерность и трудоемкость проектирования имитационной модели, сделать ее открытой системой. Это стало возможным за счет разумной декомпозиции интегрированной модели верхнего уровня и выделения повторно используемых типовых фрагментов, которые используются в качестве базовых, конструктивных элементов моделей.

Использование объектно-ориентированного подхода при разработке имитационной модели особенно актуально при современных требованиях к программным комплексам: моделирование ситуаций, адаптация моделей в процессе работы, открытость, масштабируемость, совместимость со стандартными форматами данных.

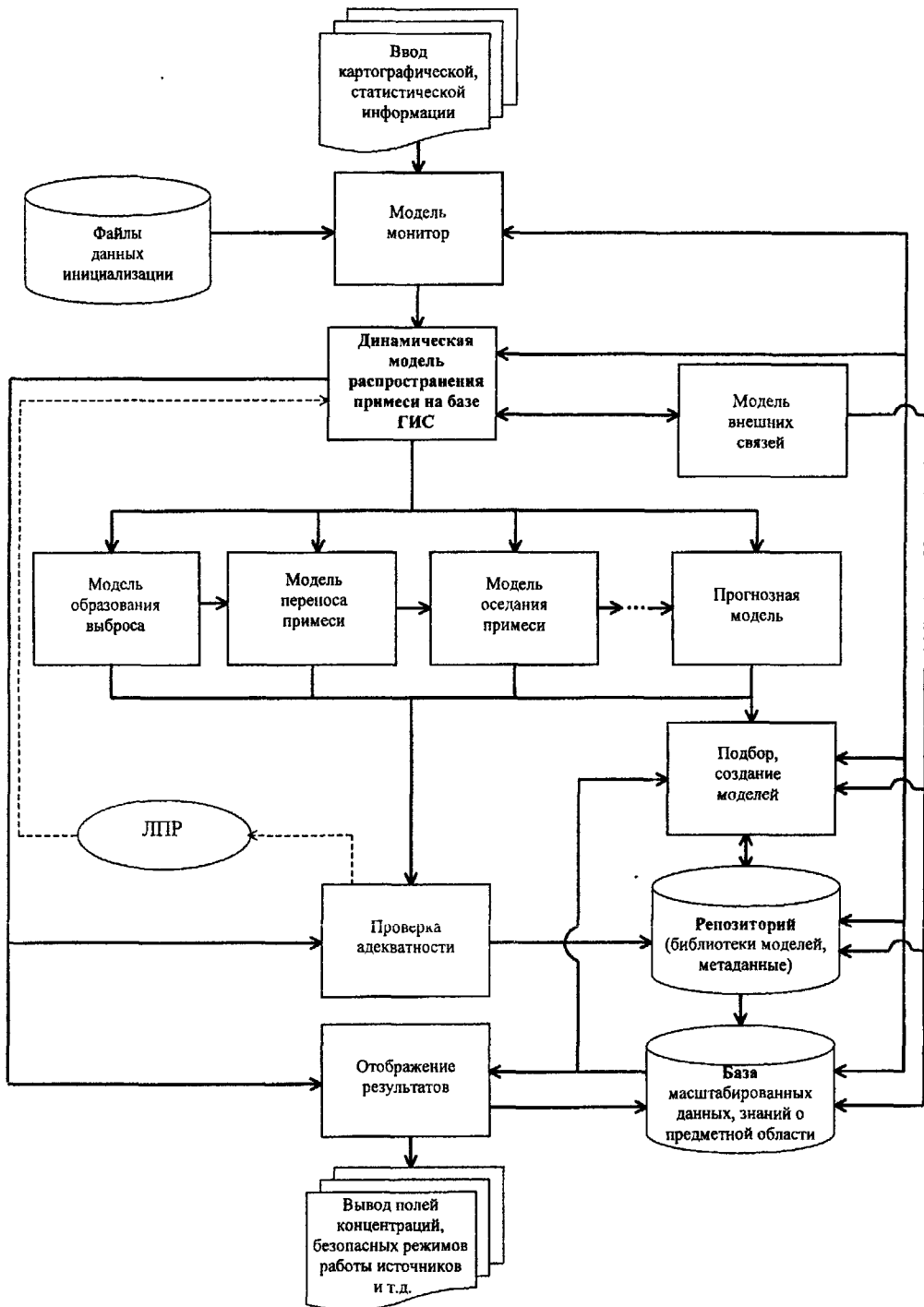


Рис. 1. Структура имитационной модели распространения загрязнений

При этом значительно упрощен процесс внесения изменений в моделирующий алгоритм. Достаточно подобрать для каждого из этапов распространения загрязнений (в зависимости от выбранной степени детализации) свою эталонную модель-объект, хранящуюся в репозитории и «настроить» ее на текущие условия моделирования.

Как показано на рис. 1, структура имитационной модели, построенной на базе геоинформационного подхода, включает такие основные блоки, как объектно-ориентированные модели, модель внешних связей, репозиторий, базы масштабированных данных (знаний) о предметной области.

Объектно-ориентированные модели - это:

модель-монитор - она осуществляет создание и управление сценарием моделирования (установку временных интервалов, выбор альтернатив и др.);

модель внешних связей системы - она определяет правила взаимодействия (интерфейс) с внешним миром, осуществляет контроль доступа и управление распределенной обработкой данных;

внутренняя модель - динамическая модель распространения примеси на базе ГИС, она реализует взаимодействие моделей-объектов и моделей-процессов;

модели-процессы (модель выброса, переноса, оседания примеси) соответствуют заданным этапам распространения загрязнений.

Репозиторий используется для хранения и управления библиотеками моделей, метаданными.

Базы масштабированных данных (знаний) о предметной области включают электронные карты - модели пространственных объектов и т.д.

Модель внешних связей обеспечивает интерфейс с внешней средой.

Реализация цикла моделирования состоит из этапов: задание начального состояния системы, сценария моделирования, выполнение  $N$  итераций модельных расчетов, интерактивного представления результатов моделирования.

Проведение серии расчетов завершается анализом их результатов и выводом лица, принимающего решение (ЛПР) о пригодности выбранной системы

управляющих показателей и предложенной структуры модели для имитации процесса распространения примеси. При необходимости происходит корректировка первоначальной модели. В этом случае осуществляется повторное тестирование модели до получения положительных результатов по формированию внутренней модели.

После принятия решения о пригодности разработанной внутренней модели для имитации процесса распространения загрязнений, она используется для проведения динамических прогнозных исследований экологической обстановки в горнопромышленном регионе при различных значениях управляющих параметров и различных значениях нормативов. Целью таких расчетов могут являться определение наиболее безопасных режимов работы предприятий в части выбросов вредных веществ, разработка конкретных природоохранных мероприятий (проектирование лесопосадки, регулярный контроль участков аварийных превышений ПДК) и другие.

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке моделей и методов геомоделирования распространения загрязнений, таких как:

1. Объектно-ориентированный метод представления данных об изменчивости загрязнений в пространстве и времени в виде динамических ГИС-моделей зон загрязнения;
2. Методика расчета приземных концентраций вредных веществ на базе динамических ГИС-моделей зон загрязнения.

**Объектно-ориентированный метод** представления данных об изменчивости загрязнений на базе ГИС позволяет более экономно хранить и эффективно обрабатывать данные о загрязнении, по сравнению с традиционными методами расчета и представления информации о зоне загрязнения в виде множества точек на поверхности с набором их координат и соответствующих значений концентраций примесей.

Суть метода заключается в объединении групп точек в усредняющие области – зоны, на границе которых значение концентрации не меньше некоторо-

го заданного. Такое объединение реализовано с помощью инструментария ГИС (построение полигонов Воронова и др.).

Динамическая ГИС-модель загрязнения - это совокупность зон (областей) загрязнения, образованных в приземном слое атмосферы за период времени  $\Delta t$ .

В соответствии с моделью данных ГИС, зоны помещены на отдельном слое пространственных данных и сопровождаются атрибутивной информацией о временных характеристиках образования загрязнения, параметрах источника выбросов, веществах-загрязнителях. К объектам такого слоя применяются групповые операции, например, наложение на карту поверхности, выбор жилых объектов, попадающих в зоны аварийного превышения значений ПДК и т.д.

Тематические слои сопровождаются атрибутивными базами данных (БД), содержащими необходимую информацию, которая связывается с пространственными объектами через систему идентификаторов.

Отдельные слои загрязнения объединяются в интегрированные ГИС-модели объектов с использованием принципа пространственно-временного масштабирования (согласно одному из указанных выше этапов геоинформационного подхода). На рис. 2 показан пример такой интегрированной ГИС-модели загрязнения.

Элементарные объекты этой модели загрязнения образованы за  $n$  временных координатных интервалов длительностью  $\Delta T_k$  согласно правилам:

$$Model_k^n = \sum_{j=1}^n SubModel_k^j, \text{ если } n \in [1..L_{k+1}]; \quad (1)$$

$$Model_k^n = Model_{k+1}^a + \sum_{j=1+(n-b)}^n SubModel_k^j, \text{ если } \begin{cases} n > L_{k+1}, \\ n = aL_{k+1} + b, \\ a, b - \text{целые,} \end{cases} \quad (2)$$

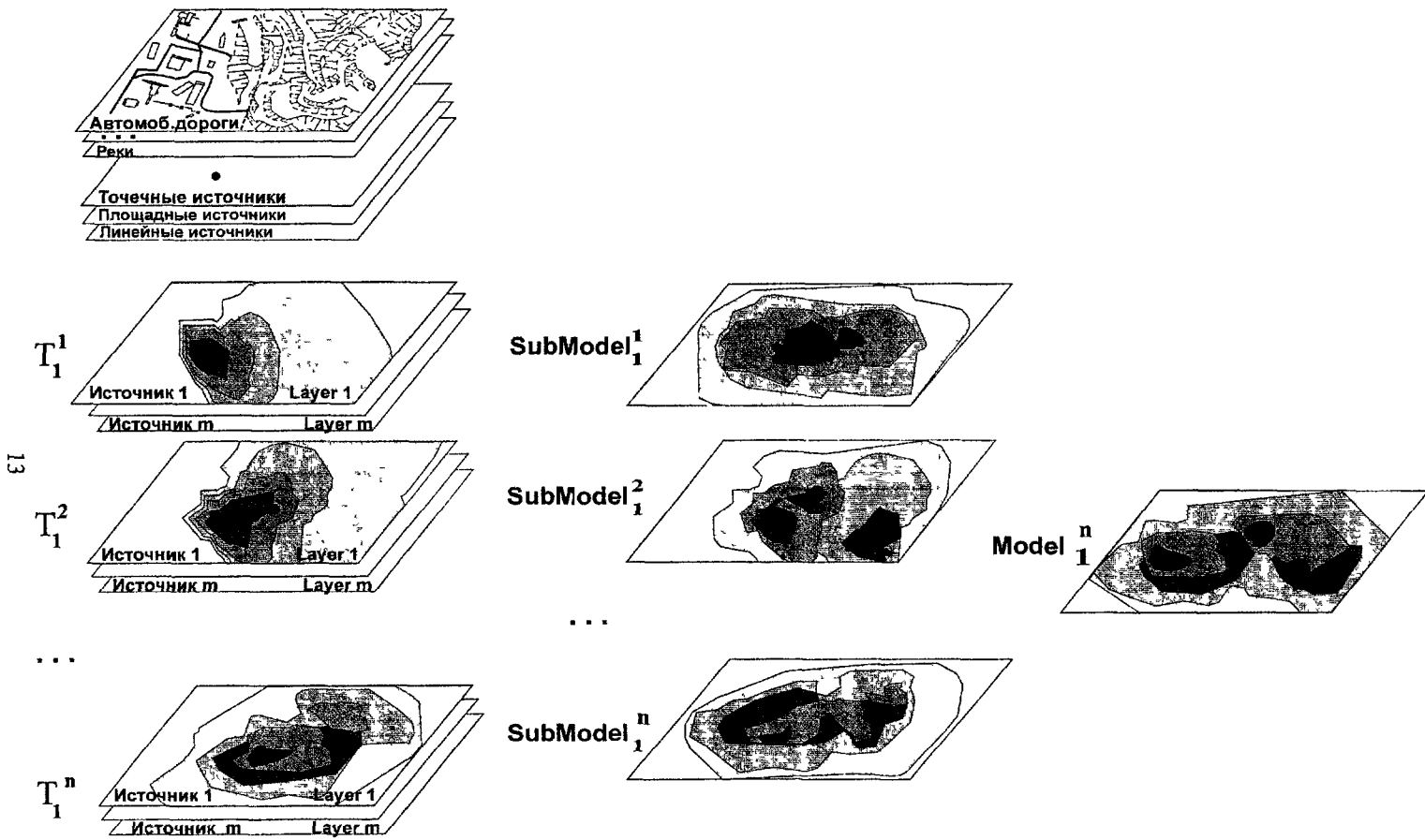


Рис. 2. Построение модели загрязнения за  $n$ -координатных интервалов длительности  $\Delta T_1$  ( $n$  - суток)

где  $k$  – номер координатного интервала времени («1»=час, «2»=сутки, «3»=неделя и т.д.);

$$k \in [0..K]; n \in N;$$

$T_k$  -  $k$ -й координатный интервал времени;

$T_k^n$  -  $n$ -й координатный интервал времени длительности  $\Delta T_k$  (2-й час, 4-е сутки);

$$\Delta T_k, T_k, T_k^n \in R$$

$L_k$  - количество  $(k-1)$ -х координатных интервалов времени, образующих  $\Delta T_k$ ;

$$L_k \in N$$

Слой загрязнения, образованный за  $T_k^n$ , определяется как

$$SubModel_k^n = SubModel(T_k^n) = \sum_{j=1}^m Layer_j(T_k^n) = \sum_{j=1+(n-1)L_k}^{nL_k} SubModel_{k-1}^i;$$

где  $SubModel_0^0$  - слой загрязнения при начальных условиях;

$Layer_j(T_k^n)$  - распределение порций загрязнения от  $j$ -го источника за  $T_k^n$ ;

$j \in 1..M$  - номер источника загрязнения.

На базе разработанного метода были сформированы электронные карты горнопромышленного региона и выделены дополнительные тематические слои, необходимые для создания ГИС-модели загрязнения («Зоны загрязнения», «Зоны оседания», «Точечные источники» и другие).

**Методика расчета концентраций** вредных веществ на базе ГИС-моделей загрязнения состоит из следующих основных частей:

1. Расчет максимальных приземных концентраций вредных веществ;
2. Расчет параметров распределения приземных концентраций относительно каждой оси розы ветров;
3. Построение интегральной поверхности зоны загрязнения вдоль каждого из направлений ветра;



4. Настройка модели процесса распространения загрязнений;
5. Имитационное моделирование распространения загрязнений с использованием ГИС-технологий, сохранение результатов в репозитории.

### 1. Расчет максимальных приземных концентраций вредных веществ

Для расчета максимальных концентраций вдоль каждого из  $i$  - направлений ветра используется методика ОНД-86:

$$x_{mi}(t) = 3.223 \sqrt{V(t)\Delta T(t)H^2} \left( 1 + 2.83 \sqrt{\frac{W_i(t)^2 D}{H^2 \Delta T(t)}} \right), \quad \text{если } \sqrt[3]{\frac{V(t)\Delta T(t)}{H}} < 3.08, \quad (1)$$

иначе

$$x_{mi}(t) = 5.645 \sqrt{V(t)\Delta T(t)H^5} \left( 1 + 2.83 \sqrt{\frac{W_i(t)^2 D}{H^2 \Delta T(t)}} \right); \quad (2)$$

$$c_{mi}(t) = \frac{AMFn(t)n(t)}{H^2 \sqrt[3]{V(t)\Delta T(t)}}, \quad (3)$$

где  $A$  – коэффициент температурной стратификации района,  $c^{2/3}$  град<sup>1/3</sup>;

$F$  – безразмерный коэффициент скорости оседания вредных веществ;

$D$  – диаметр источника, м;

$H$  – высота выброса над уровнем земли, м;

$m(t)$ ,  $n(t)$  – безразмерные коэффициенты выхода газов из источника;

$V(t)$  – объемная скорость выброса, м<sup>3</sup>/с;

$i$  – направление ветра (по 8-ми или 16-ти румбовой розе ветров);

$\omega_{i,j}(t)$  – вероятность события, заключающегося в реализации в  $i$ -м направлении  $j$ -го интервала скорости ветра, задано условие:  $\sum_i \sum_j \omega_{i,j}(t) = 1$ ; (4)

$j$  – интервал значений скорости ветра;  $j \in [0..MaxJ]$ ;

$Umin_j$  – минимальное значение скорости ветра для  $j$ -го интервала;

$Umax_j$  – максимальное значение скорости ветра для  $j$ -го интервала;

$U_j$  – значение скорости ветра в  $j$ -м интервале;  $Umin_j \leq U_j \leq Umax_j$ ;

$jStep$  – коэффициент шага скорости ветра;  $jStep \in [0..S]$ ;

$$U_j = Umin_j + \frac{Umax_j - Umin_j}{S} \cdot jstep; \quad (5)$$

$M_i(t)$  – исходная концентрация примеси в порции выброса ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ), пропорциональна  $\sum_j \omega_{i,j}(t)$ ;

$W_i(t)$  – линейная скорость газов на выбросе ( $\text{м}/\text{с}$ ), обратно пропорциональна  $U_j(t)$ ;

$\Delta T(t)$  – разность температур между температурой газа в выбросе и воздухом, град;

$c_{mi}$  – максимальная приземная концентрация вредных веществ,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;

$x_{mi}$  – расстояние от источника нагретых выбросов до границы зоны  $c_m$ , м.

## 2. Расчет параметров распределения приземных концентраций веществ-загрязнителей относительно каждой оси розы ветров

Согласно ОНД-86 принят гауссов закон распределения концентраций вредных веществ перпендикулярно к направлению ветра. Обозначим  $\mu = \mu_{\text{OND}_i}(t)$  и  $\sigma = \sigma_{\text{OND}_i}(t)$ . Для расчета параметров  $\sigma^2$  и  $\mu$  (дисперсии и среднего) использованы следующие соотношения:

$$\bar{x} - \frac{k\sigma}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} + \frac{k\sigma}{\sqrt{n}} ; \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{D}, \quad (7)$$

где  $n$  – число наблюдений;

$x_i$  – наблюдаемое значение;

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \text{– среднее значение по всем наблюдениям;} \quad (8)$$

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad \text{– дисперсия выборки.} \quad (9)$$

$k$  – коэффициент, рассчитываемый с использованием формулы:

$$\lambda = \frac{2 \cdot \int_k^{\infty} \frac{-x^2}{e^{\frac{x^2}{2}}} dx}{\sqrt{2 \cdot \pi}}, \quad (10)$$

где  $\lambda$  – вероятность ошибки при определении значения  $\lambda$  по известной теоретической дисперсии  $D$ ,  $\lambda < 1$ . Вероятность ошибки принимается в диапазоне (0,05...0,2) в зависимости от требуемой точности расчета.

### 3. Построение интегральной поверхности зоны загрязнения вдоль каждого из направлений ветра

Автором предложена математическая модель интегральной поверхности зоны загрязнения:

$$f(x, y) = \frac{\frac{-(y-\mu)^2}{2 \cdot \sigma(x)^2}}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma(x)}, \quad (11)$$

$$\sigma(x) := \sigma l \cdot x e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2 \cdot \sigma l^2}}, \quad (12)$$

где  $f(x, y)$  – плотность распределения концентрации примеси, скапливающейся в приземном слое атмосферы вдоль оси направления ветра (ось OX);

$\mu$ ,  $\sigma$  – параметры гауссова распределения примеси в направлении, перпендикулярном оси воздействия ветра (все факторы, оказывающие влияние на рассеяние, действуют достаточно равномерно, так что их суммарное воздействие можно описать нормальным законом распределения).

$\mu l$ ,  $\sigma l$  – параметры логнормального распределения примеси в направлении оси воздействия ветра (в условиях, когда можно выделить один фактор, оказывающий преобладающее воздействие на рассеяние (ветер), логнормальный закон является удобной формой описания характера распределения примеси).

При проецировании в ГИС интегральной поверхности зоны загрязнения на плоскость  $XOY$  образуются поля концентраций. *Поле* - это область, в пределах которой значения концентраций входят в заданный диапазон последних.

Возможность обработки полей концентраций как единых пространственных объектов в ГИС, которым присущи такие свойства, как площадь, периметр, величина граничной концентрации примеси, местоположение в пространстве, открывает новые возможности анализа данных по распределению вредных веществ. Построение модели загрязнения включает:

- объединение рассчитанных полей концентраций по всем  $i$ -слоям с образованием временного слоя «Новые зоны загрязнения»;
- размещение текущих зон загрязнения на слое «Зоны оседания»;
- расчет коэффициента оседания примеси;
- применение процедуры оседания к слою «Зоны оседания»;
- наложение слоя «Новые зоны загрязнения» на «Зоны оседания» с образованием итоговых зон на слое «Зоны загрязнения».

На рис. 3 показан процесс изменения слоя «Зоны загрязнения» в моменты времени  $T1..T4$ , визуальное отображающий динамику распространения загрязнений.

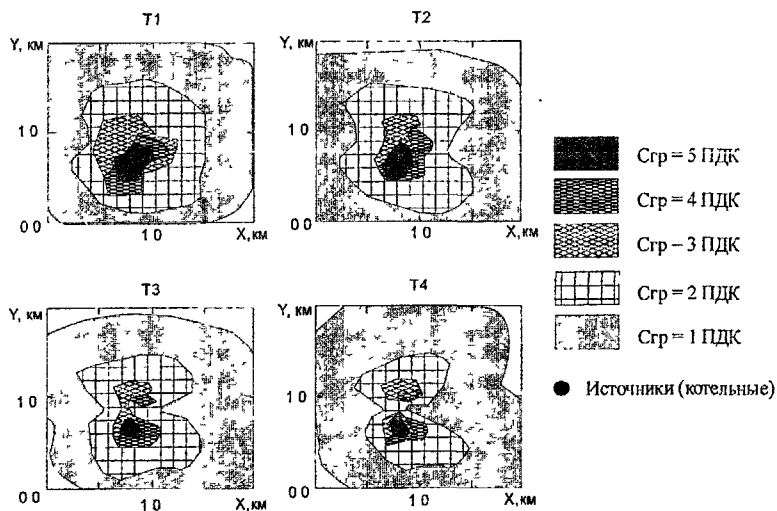


Рис. 3. Изменение слоя «Зоны загрязнения» в моменты времени  $T1...T4$

В четвертой главе диссертационной работы проведено апробирование разработанных моделей и методов распространения загрязнений, построенных на основе геоинформационного подхода.

Апробирование проводилось с использованием данных по Междуреченскому угледобывающему региону Кемеровской области.

В атмосфере этого промышленного района отмечено содержание пыли с примесью сульфидов, повышенное содержание метана, выделяющегося из шахт при разработке угольных пластов, а также большое содержание золы, образующейся при сжигании угля.

Была создана имитационная модель распространения загрязнений для трех видов источников – котельные (точечные источники), городской транспорт (линейные источники) и технологическое и транспортное оборудование (площадные источники).

Для расчета выбросов от городского транспорта вся протяженность маршрутов движения была разбита на линейные участки (линейные источники длиной 200 м). Все транспортные единицы и их удельные выбросы были распределены вдоль по этим участкам.

Площадные источники были разделены на участки 500x500 м. Выбросы формировались с учетом технологического и транспортного оборудования, работающего на этих участках.

При моделировании рассеяния задавались расчетные площади, т.е. пространственные объекты, для которых производился расчет загрязнения (нормативные санитарно-защитные зоны - СЗЗ, жилые зоны и множество расчетных точек).

Расчет по нормативной СЗЗ и границе жилой зоны (линейные объекты) предполагал расчет загрязнения в каждом узле линии, а также, если расстояние между этими узлами велико, то и на множестве точек на каждом отрезке так, чтобы расстояние между точками не превышало выбранного шага.

Созданы электронная карта поверхности угольной шахты им. Ленина в масштабе 1:5000, карта Томь-Усинского района Кузбасса масштаба 1: 25000.

Для создания топологической легенды карты разработаны необходимые модули расширений на встроенном языке программирования ГИС ArcView - Avenue.

Источники атрибутивной информации, использованные при создании карт, - это разделы «Экология» проектов предприятий региона (предельно допустимые выбросы и предельно допустимые сбросы, лимиты размещения отходов), экологические паспорта предприятий, а также различные формы статистической отчетности.

Результаты моделирования приведены в табл. 1 и на рис. 4-5.

Таблица 1

Максимальные приземные концентрации примесей в районе г. Междуреченск  
(точечные источники – котельные)

№	Наименование примеси	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Доля ПДК	Концентрация, мг/м <sup>3</sup>
1	Взвешенные вещества	0,500	3,705	1,850
2	Оксид азота	0,085	1,816	0,154
3	Сернистый ангидрид	0,500	1,136	0,568
4	Оксид углерода	5,000	0,698	3,490

На базе имитационной модели проведено сравнение точности расчетов по традиционной гауссовой модели рассеяния и по предложенной автором динамической модели распространения загрязнений. При сравнении использованы такие соотношения:

1. Относительная погрешность расчетов:

$$Error(x_i, y_i) = 100 \frac{C(x_i, y_i) - C^*(x_i, y_i)}{C(x_i, y_i)}$$

2. Средняя квадратичная ошибка:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C(x_i, y_i) - C^*(x_i, y_i))^2}$$

здесь  $(x_i, y_i)$  – координаты расчетных точек;

$C(x_i, y_i)$  – измеренное значение концентрации;

$C^*(x_i, y_i)$  – расчетное значение концентрации.

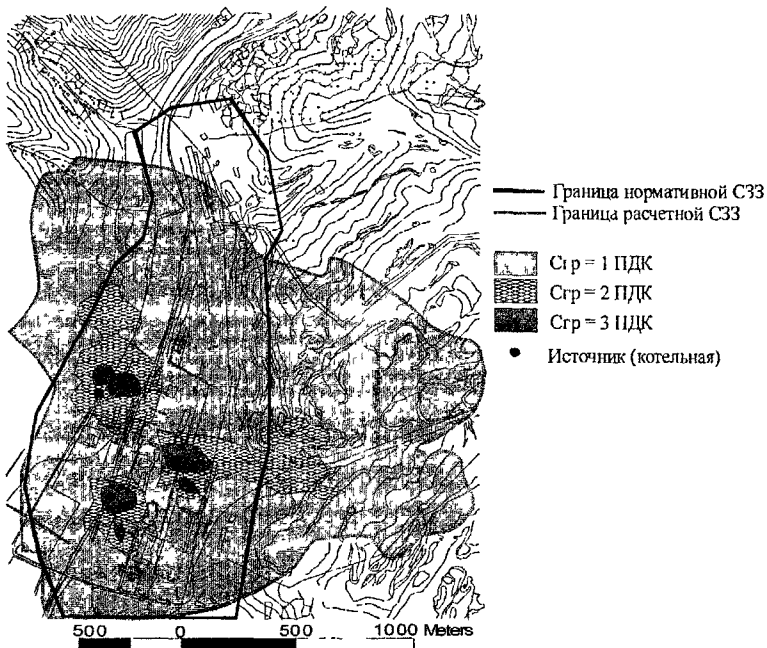


Рис. 4. Построение расчетной санитарно-защитной зоны

Сравнение показало снижение средней квадратичной ошибки на 10-15% при применении динамической модели, предложенной автором.

3. Средняя ошибка расчетов с использованием полей концентраций:

$$E_i(t) = 100 S(z_i(t)) / S(z_i(t) \cup z_{ij}^*(t)) \setminus [z_i(t) \cap z_{ij}^*(t)],$$

где  $E_i(t)$  - ошибка расчета по методу  $j$  для  $i$ -го значения концентрации в момент времени  $t$ ;

$z_i(t)$  - сводное поле концентрации, построенное по данным наблюдений в момент времени  $t$  (представляет собой объединение наблюдаемых полей с  $i$ -м заданным значением граничной концентрации);

$z_{ij}^*(t)$  - сводное поле концентрации, построенное с использованием  $j$ -го метода в момент времени  $t$  (представляет собой объединение расчетных полей с  $i$ -м заданным значением граничной концентрации);

$S(z)$  - площадь поля.

В табл. 2 показаны результаты сравнения полей концентраций, рассчитанных по методике автора и нормативной методике ОНД-86 с фактическими данными наблюдений. На рис. 5 фактически замеренные концентрации примеси показаны сплошной черной линией.

При этом средняя ошибка расчетов по традиционной гауссовой модели составляет 16,697 %, для предложенной методики средняя ошибка - 11,890%.

Таблица 2

Сравнение полей концентрации CO, рассчитанных по методике, предложенной автором и гауссовой модели с фактическими данными наблюдений

№	Поля концентраций	Фактическое знач. концентрации, мг/м <sup>3</sup>	Ошибка по методике ОНД-86, %	Ошибка по методике, предложенной автором, %
1	Поле концентрации 1	1,050	4,481	3,531
2	Поле концентрации 2	1,575	6,372	6,831
3	Поле концентрации 3	2,100	19,696	9,800
4	Поле концентрации 4	2,624	15,141	15,562
5	Поле концентрации 5	3,149	37,792	23,728
<b>Средняя ошибка:</b>			16,697	11,890

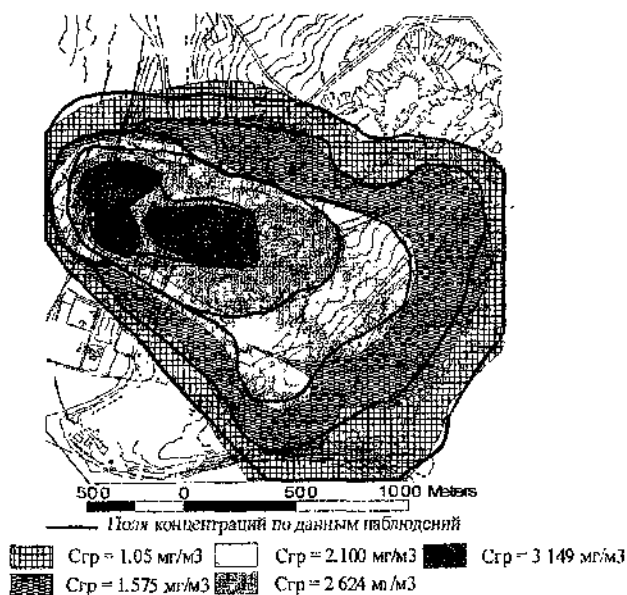


Рис.5. Поля концентраций CO, рассчитанные на базе динамической ГИС-модели загрязнения



Анализ табл. 2 и рис. 5 показал, что предложенные объектно-ориентированные модели и методы на базе ГИС-технологий, позволяют строить карту загрязнения, близкую к фактически наблюдаемой. Это объясняется более точным воспроизведением динамики таких процессов, как образование выброса, перенос, оседание примеси.

Апробация разработанных моделей и методов с использованием данных о загрязнении атмосферы Междуреченского горнопромышленного района, показала их адекватность реальным объектам и процессам.

На базе созданной имитационной модели распространения загрязнений предполагается в дальнейшем решать задачи анализа и контроля сети мониторинга (с сокращением количества постов наблюдений). Кроме того, поля концентраций примеси, наложенные на карту поверхности, могут быть использованы:

- при проектировании природоохранных мероприятий (планировании границ санитарно-защитных зон, территорий, участков лесопосадок и т.д.);
- для анализа взаимосвязей между различными факторами производства и состоянием окружающей среды.

Разработанный объектно-ориентированный метод представления загрязнения природной среды в виде динамических ГИС-моделей может быть применен при исследовании экологического состояния геосистем различного масштаба и моделировании экологических ситуаций различной природы (распространение загрязнений в воде, почве, различных слоях атмосферы).

Предложенный геоинформационный подход применим при моделировании ситуаций, связанных с использованием пространственных данных, изменяющихся во времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе с применением объектно-ориентированной методологии и технологии ГИС решена важная научно-практическая задача разработки нового геоинформационного подхода к моделированию распространения загрязнений. Основные результаты работы таковы:

1. Исследована система экологического мониторинга в горнопромышленном регионе, рассмотрены методы расчета распространения примесей; проведен анализ современных информационных технологий, используемых при моделировании загрязнений.
2. Разработан новый геоинформационный подход к моделированию экологических ситуаций, позволяющий объединять на единой картографической основе разнородные модели с целью исследования изменчивости состояния природной среды в пространстве и времени.
3. Разработана имитационная модель распространения загрязнений, которая позволяет проводить исследование состояния природной среды и отличается от существующих универсальностью структуры, свойствами открытости, наращиваемости и масштабируемости в пространстве и времени.
4. Разработан объектно-ориентированный метод представления данных об изменчивости загрязнений в пространстве и времени в виде динамических ГИС-моделей зон загрязнения.
5. Разработана методика расчета приземных концентраций вредных веществ на базе динамических ГИС-моделей зон загрязнения, которая позволяет учитывать нестационарность выбросов, метеоусловий и характера подстилающей поверхности.
6. Сформирована система электронных карт горнопромышленного региона как основа гео моделирования экологических ситуаций.
7. Создано программное обеспечение, обеспечивающее функционирование имитационной модели распространения загрязнений на базе ГИС ArcView.
8. Проведена апробация разработанных моделей и методов с использованием данных о загрязнении атмосферы Междуреченского горнопромышленного района, которая показала адекватность предложенного геоинформационного подхода.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Шек В.М., Булатова А.А. Построение интегрированного банка пространственно-временной информации горного производства // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ. - 2001. - №2. - С. 185-189.
2. Шек В.М., Филиппова А.А. Моделирование экологических аспектов горного предприятия: практика и перспективы. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ. - 2002. - №2. - С. 168-171.
3. Филиппова А.А., Шек В.М. Система атрибутивных данных в эко-ГИС для горного предприятия // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ. - 2002. - №5. - С. 208-210.
4. Филиппова А.А., Шек В.М. Структура геоинформационного интерфейса // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ. - 2002. - №9. - С. 241-244.
5. Филиппова А.А., Шек В.М. Автоматизированная система экологического мониторинга угольной шахты на базе ГИС технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ. - 2003. - №12. - С. 141-143.
6. Филиппова А.А., Шек В.М. Моделирование и прогноз рассеяния выбросов в атмосферу на базе ГИС. Материалы семинара №9 «Неделя горняка-2003» // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ. - 2003. - №2. - С. 89-91.
7. Филиппова А.А., Шек В.М. Организация атрибутивных данных в модели экологического воздействия угольного предприятия на окружающую среду. Материалы семинара №11 «Неделя горняка-2003» // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М.: МГГУ. - 2003. - №2. - С. 167-170.

Подписано в печать 08 сентября 2003 г. Формат 60х90/16

Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 418

Типография Московского государственного горного университета, Ленинский проспект, 6

#14374

2003-A  

---

14374