

Ковин Роман Владимирович

**Алгоритмическое и программное обеспечение
геоинформационной системы
для анализа двумерных геополей**

05.13.11 — Математическое и программное обеспечение
вычислительных машин, комплексов и компьютерных
сетей

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск — 2004

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Н.Г. Марков

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.П. Бондаренко

кандидат технических наук С.А. Останин

Ведущая организация:

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

Защита состоится « 22 » декабря 2004 г. в 15 ч. в ауд. 214 на заседании диссертационного совета Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84, институт «Кибернетический центр» ТПУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «___» ноября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к.т.н., доцент



М.А. Сонькин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Одним из наиболее актуальных и динамично развивающихся сегодня направлений в геоинформатике является пространственный анализ объектов, представляющих собой протяженные непрерывные поверхности. Такие поверхности представляют распределение в пространстве температуры и давления, высот рельефа местности над уровнем моря, распределения химических элементов в почвах и т.д. В геоинформатике поверхности, однозначно описываемые функцией от двух пространственных координат x и y , получили название *двумерные геополы*.

Под *анализом двумерных геополей* понимают *пространственный анализ* поверхностей, включающий также их визуализацию, позволяющий сопоставлять разнородные пространственные данные и выявлять взаимосвязи между ними. Для визуализации геополей традиционно используют карты изолиний и изоконтуров. Анализ также предполагает использование сложных методов и алгоритмов обработки геополей с целью выявления различных пространственных закономерностей, присущих исследуемым поверхностям, и формирование карт вторичных признаков геополей, таких как уклоны и экспозиции, кривизна поверхностей и т.д.

Важным и практически значимым классом задач анализа двумерных геополей являются *задачи восстановления геополей*. Решение этих задач сводится к поиску значений геополя в точках, где измерения не проводились. Решению задач восстановления геополей посвящено значительное число работ отечественных и зарубежных ученых: В.И. Аронова, В.В. Демьянова, М.Ф. Каневского, О. Р. Мусина, Г. Акима, Д. Дугласа, В. Франклина, Д. Ватсона и других. Однако вследствие некорректности задач восстановления, многие развитые ими методы и алгоритмы оказываются неэффективными при решении практически интересных задач восстановления. Поэтому актуальной продолжает оставаться проблема создания новых методов, алгоритмов и программных средств для восстановления двумерных геополей.

В настоящее время на рынке программного обеспечения (ПО) имеется большое число продуктов, предназначенных для анализа двумерных геополей. Каждый из них позволяет использовать тот или иной набор функций пространственного анализа. При обработке больших массивов пространственных данных большинству продуктов присущи недостатки, связанные с отсутствием в них средств работы с базами данных. На наш взгляд, более перспективным направлением является использование для такого анализа геоинформационных систем (ГИС), в которых решена проблема хранения и оперирования большими объемами пространственных данных и уже изначально реализован базовый набор функций пространственного анализа элементарных объектов. Проведенные исследования функций современных ГИС показали, что многие из них, к сожалению, имеют небольшой набор средств для решения указанных задач или не имеют таковых вообще. Среди наиболее успешных разработок можно отметить продукты Spatial Analyst и Geostatistical Analyst фирмы ESRI (США), причем они не являются самостоятельными системами, а представляют собой дополни-

тельное ПО к ГИС ArcGIS той же фирмы. Основными недостатками этих продуктов являются малое число методов восстановления геополей по точечным данным и неэффективность методов восстановления геополей по изолинейным данным. Кроме того, в них отсутствуют средства редактирования геополей, и поддерживается только одна из требуемых цифровых моделей геополей.

Учитывая изложенное, можно сделать вывод об актуальности проблемы создания инструментальной ГИС для полноценного анализа двумерных геополей, позволяющей реализовывать проблемно-ориентированные ГИС.

Исследования и разработки по теме проводились в соответствии с утвержденными планами НИР Института «Кибернетический центр» ТПУ в 1996-2004 гг., а также были поддержаны грантами РФФИ № 00-07-90124 и № 03-07-90124, грантом № 00-15-98478 поддержки ведущих научных школ России и грантом молодого ученого ТПУ 2004 г.

Целью диссертационной работы является создание алгоритмического и программного обеспечения инструментальной геоинформационной системы для анализа двумерных геополей. Основным требованием к системе является возможность реализации на ее основе проблемно-ориентированных геоинформационных систем, предназначенных для решения прикладных задач в различных областях знаний, где необходим анализ геополей. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработка принципов построения и структуры инструментальной ГИС.
2. Создание математического обеспечения инструментальной ГИС. Решение этой задачи предполагает модификацию существующих и разработку новых методов и алгоритмов анализа двумерных геополей и исследование их эффективности.
3. Разработка ПО инструментальной ГИС для поддержки ввода, хранения, обработки и визуализации геополей с целью их анализа, а также для визуализации результатов этого анализа. Результатом решения этой задачи должны явиться программные средства, реализующие созданные методы и алгоритмы анализа геополей, а также реализующие проблемно-ориентированные ГИС.
4. Апробация инструментальной ГИС путем создания ряда проблемно-ориентированных ГИС для решения практических задач в геологии, экологии и в нефтегазовой отрасли. Апробация таких проблемно-ориентированных ГИС должна выполняться при анализе реальных геополей.

Методы исследований. В работе использованы методы математического моделирования, теории алгоритмов, методы объектно-ориентированного проектирования ПО и математической статистики.

Научную новизну полученных в работе результатов определяют:

1. Многоэтапный способ восстановления двумерных геополей по исходным точечным данным.
2. Метод плавающих секущих и реализующий его алгоритм, предназначенные для восстановления геополей по изолинейным данным и отличающиеся от известных использованием одномерной сплайн-интерполяции для восстановления функции двух переменных.
3. Алгоритм поиска ближайших изолиний, использующий многослойное

пространственное индексирование, и алгоритм обработки совпадающих точечных данных, использующий пространственное индексирование.

4. Адаптивный алгоритм поиска ближайших точек в задаче восстановления двумерных геополей по точечным данным.

5. Подход к редактированию моделей геополей, представленных регулярными сетями, при решении задач восстановления двумерных геополей на стадии пост-обработки.

6. Результаты исследования предложенных многоэтапного способа восстановления двумерных геополей, метода плавающих секущих и реализующих их алгоритмов.

Практическая ценность и реализация результатов работы. Практически значимыми являются созданные модели данных, методы, алгоритмы и программные средства инструментальной ГИС SurfMapper для анализа двумерных геополей. Программные средства функционируют в среде универсальной ГИС MapInfo Professional на компьютерах типа IBM PC под управлением операционной системы Microsoft Windows. Объем исходного кода ПО разработанной системы составляет более 80 000 строк на языках C++, Object Pascal и MapBasic. На основе инструментальной ГИС SurfMapper создан ряд проблемно-ориентированных ГИС для различных областей знаний. Проблемно-ориентированные ГИС были внедрены в Центре госсанэпиднадзора № 81 Минзатома РФ (г. Северск Томской области), в Омской геологоразведочной экспедиции и в Томском отделении Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минерального сырья. Средства инструментальной ГИС SurfMapper были также использованы при разработке подсистемы анализа геополей в составе корпоративной геоинформационной системы «Магистраль-Восток» для ОАО «Востокгазпром». Все внедрения подтверждены актами. Эффективность каждой из созданных проблемно-ориентированных ГИС показана при решении практически интересных задач с использованием реальных данных.

Готова к тиражированию англоязычная версия инструментальной системы SurfMapper, включающая документацию на английском языке.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанное на основе известных методов алгоритмическое и программное обеспечение инструментальной ГИС SurfMapper позволяет эффективно решать ряд практически значимых задач анализа двумерных геополей.

2. Созданные многоэтапный способ восстановления геополей по точечным данным, метод плавающих секущих и реализующие их алгоритмы позволяют более точно и эффективно решать практически значимые задачи восстановления двумерных геополей.

3. Предложенный подход к редактированию геополей, представленных регулярными сетями, и реализующие его средства позволяют уточнять результаты восстановления геополей на стадии пост-обработки.

4. Разработанные структура, алгоритмическое и программное обеспечение инструментальной ГИС SurfMapper и средства ее адаптации к решению конкретных задач анализа двумерных геополей позволяют создавать семейство проблемно-ориентированных ГИС.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на II и VIII Международных российско-корейских симпозиумах по науке и технологиям KORUS'98 и KORUS'2004 (Томск, 1998; Томск, 2004), Международных конференциях ИНТЕРКАРТО-4 и ИНТЕРКАРТО-5 «ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий» (Барнаул, 1998, Якутск, 1999), IV и V Международных симпозиумах по проблемам геотехнологий, связанных с охраной окружающей среды и глобальным развитием (Бостон, США, 1998; Бело Горизонте, Бразилия, 2000), на Международной конференции "Anniversary scientific conference 50 years faculty of hydrotechnics ACEG University" (София, Болгария, 1999), III Региональном научно-методическом семинаре «Применение ГИС-технологий в геокартировании» (Томск, 2000), Региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока (Томск, 2000), Международной научно-практической конференции «Геоинформатика-2000» (Томск, 2000), 4th EC conference — Historical Cities Sustainable Development: "The GIS as Design and Management Support" — HISTOCITY 2000, (Сиракузы, Италия, 2000), 4th International conference Geographic Information Science — AGILE-IV (Брно, Чехия, 2001), III Межрегиональной научно-практической конференции «Газораспределительные системы. АГНКС. АГЗС» (Томск, 2003), X Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (Томск, 2004). По результатам исследований опубликовано 24 работы, в том числе 20 статей.

Личный вклад:

1. Постановка задач исследования и разработка концепции инструментальной ГИС для анализа геополей, а также постановки задачи исследования эффективности предложенных автором алгоритмов выполнены совместно с Н.Г. Марковым.

2. Модели данных ГИС для работы с геополями и их математическое описание разработаны лично автором.

3. Метод плавающих секущих и реализующий его алгоритм разработаны лично автором.

4. Алгоритмы триангуляции и расчета изолиний, разработаны Р.И. Гаряевым и А.А. Захаровой. Алгоритмы и программы интерполяции методами кригинга и радиальных базисных функций разработаны автором совместно с М.В. Копновым. Алгоритм двумерной сплайн-интерполяции разработан М.В. Черноусовым. Алгоритм локальной полиномиальной аппроксимации разработан автором совместно с Р.В. Савицким. Остальное алгоритмическое обеспечение разработано автором лично. Адаптивный алгоритм поиска ближайших точек, его реализация и исследования эффективности выполнены автором совместно с М.В. Копновым. Результаты исследования эффективности других разработанных алгоритмов получены автором.

5. Программная реализация алгоритмов триангуляции и расчета изолиний выполнена автором совместно с Р.И. Гаряевым и А.А. Захаровой. Реализация алгоритма двумерной сплайн-интерполяции выполнена совместно с М.В. Черноусовым. Остальное ПО разработано автором лично.

6. Реализация проблемно-ориентированной ГИС «Баланс-Гидродинамик» для подсчета запасов нефтегазовых месторождений выполнена автором совместно с А.А. Захаровой и О.В. Крыловым. Реализация других проблемно-ориентированных ГИС выполнена автором.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 105 наименований и одного приложения. Объем основного текста диссертации составляет 129 страниц машинописного текста, иллюстрированного 47 рисунками и 1 таблицей.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность работы в данном научном направлении, формулируются цель и задачи исследования.

Первая глава посвящена рассмотрению проблемы анализа двумерных геополей.

Рассматривается классификация задач, возникающих при анализе двумерных геополей. Формулируется проблема автоматизации задач анализа геополей. Приводятся результаты анализа современного состояния проблемы применения ГИС и ГИС-технологий в решении задач анализа геополей. Показывается, что на сегодняшний день существует несколько подходов к решению обозначенной проблемы, однако наиболее перспективным является путь создания инструментальной ГИС для анализа двумерных геополей.

Описывается постановка задачи восстановления двумерного геополя, указывается, что эта задача является некорректной. Приводится краткий обзор существующих методов и алгоритмов восстановления таких геополей по точечным и изолинейным данным. Показываются основные сложности, возникающие при использовании этих методов, их главные недостатки. Делается вывод о необходимости модификации существующих методов и алгоритмов восстановления двумерных геополей и разработки новых.

Проводится анализ возможностей представления двумерных геополей с использованием моделей данных современных ГИС. Делается вывод о том, что существующие модели данных универсальных ГИС недостаточно эффективны для описания двумерных геополей.

На основе результатов проведенного анализа проблемы формулируются цель исследования и задачи, решаемые в диссертационной работе.

Вторая глава посвящена изложению концепции и структуры создаваемой инструментальной ГИС для анализа двумерных геополей (далее — геополей).

На основе описанных требований, предъявляемых к инструментальной ГИС, сформулированы следующие общие принципы ее построения.

1. Модели данных, функциональная структура, алгоритмические и программные средства инструментальной ГИС, с одной стороны, должны быть нацелены на решение широкого круга прикладных задач, требующих анализа геополей, а с другой стороны должны быть максимально абстрагированными от особенностей конкретных прикладных задач.

2. Особенности конкретной прикладной задачи (формат исходных данных, возможность корректировки результатов обработки, способ представления ре-

зультатов анализа геополей и т.д.) в той или иной области знаний должны легко учитываться при создании на основе инструментальной ГИС проблемно-ориентированной ГИС для решения этой задачи.

3. Создание проблемно-ориентированной ГИС на основе инструментальной ГИС должно вестись с использованием базовых модулей инструментальной ГИС, открытых обменных форматов, а также с использованием соответствующих средств адаптации последней к особенностям прикладной задачи.

В соответствии с результатами анализа современных ГИС и ГИС-технологий показано, что основу инструментальной системы должно составлять ядро универсальной векторной ГИС MapInfo Professional. В соответствии с выдвинутыми требованиями построение инструментальной системы должно выполняться по модульному принципу. При этом ядро универсальной ГИС объединяет вокруг себя модули, каждый из которых предназначен для решения различных задач, связанных с анализом геополей. Эти модули расширяют базовые функциональные возможности универсальной ГИС и являются основой для реализации ПО проблемно-ориентированных ГИС для решения конкретных прикладных задач.

Предложена трехуровневая структура инструментальной ГИС. Нижний уровень — функциональные модули, реализующие базовые операции анализа геополей. Алгоритмы, реализуемые в этих модулях, требуют больших ресурсных и временных затрат ЭВМ. Использование встроенного в универсальную ГИС специализированного языка программирования не позволяет эффективно реализовать эти алгоритмы. Поэтому все модули нижнего уровня должны реализовываться на языках высокого уровня и оформляться в виде динамических библиотек (DLL). Предлагается реализовывать большинство модулей нижнего уровня *ГИС-независимыми*. Это позволит создавать проблемно-ориентированные ГИС для *различных универсальных ГИС*.

Модули среднего уровня реализуют конкретные задачи анализа геополей. Реализацию модулей этого уровня необходимо выполнять с помощью специализированного языка, встроенного в универсальную ГИС. В итоге эти модули будут тесно интегрированы с универсальной ГИС и будут иметь доступ к большинству функций ядра такой ГИС, необходимых для работы с картографическими и атрибутивными данными. С помощью модулей нижнего уровня происходит обработка исходных данных и расчет новых. Далее модулями среднего уровня формируется необходимое представление новых данных.

Верхний уровень должен состоять из интерфейсных модулей, реализованных на специализированном языке универсальной ГИС. Основное их назначение — это расширение интерфейса пользователя универсальной ГИС с помощью дополнительных меню, панелей инструментов и окон. Они позволяют выполнять часть функций по адаптации ПО инструментальной ГИС при создании проблемно-ориентированных ГИС.

В третьей главе рассматриваются методы и алгоритмы, положенные в основу инструментальной ГИС и результаты их исследования.

Описывается предложенный многоэтапный способ восстановления геополя по точечным данным.

Этап 1. Загрузка исходных данных. Этот этап предполагает преобразование данных, представленных в виде цифровой карты, в пригодный для расчета формат. В таком формате каждая точка исходного набора данных должна быть представлена в виде записи с атрибутами X , Y и Z . Атрибуты X и Y определяют координаты точки в прямоугольной системе координат, а атрибут Z — значение геополя в этой точке.

Этап 2. Фильтрация исходных данных в признаковом пространстве. На этом этапе из набора данных, сформированных на шаге 1, удаляются точки, атрибут Z которых не соответствует заданным условиям.

Этап 3. Фильтрация исходных данных в XY -пространстве. На этом этапе из набора данных, сформированных на шаге 2, удаляются точки, положение которых не соответствует заданным условиям (точки, лежащие вне исследуемой области).

Этап 4. Обработка совпадающих точек в XY -пространстве. На этом этапе в наборе данных, сформированных на шаге 3, находятся точки, расстояние между которыми меньше заданной величины. При этом группа близко расположенных точек заменяется одной, а значение атрибута Z устанавливается по заданному правилу.

Этап 5. Выполняется восстановление геополя выбранным методом.

Этап 6. Формируется цифровая модель геополя (регулярная или триангуляционная сеть).

Рассмотрим основные этапы предложенного способа. На этапе обработки совпадающих точек в XY -пространстве учитывается соотношение объема исходных данных и объема восстановленной сети. Если это соотношение невелико, то в целях минимизации временных затрат целесообразно разрядить исходную сеть точек без существенного ущерба для точности восстановления. Эта обработка особенно необходима в случае кластерного расположения исходных точек. Для этого можно удалить точки, расстояние между которыми превышает заданное значение.

Суть предложенного алгоритма удаления совпадающих точек: для каждой точки исходного набора выполняется поиск точек, попадающих в окружность с центром в этой точке и заданным радиусом. В исходный набор точек вносится новая точка с усредненными XY -координатами (для текущей точки и найденной группы точек) и значением признака, вычисленным по выбранному правилу. Текущая точка и найденная группа точек из исходного набора исключаются. Алгоритм продолжает свою работу до тех пор, пока не дойдет до конца исходного набора точек.

Наиболее трудоемкой частью этого алгоритма является поиск ближайших точек. Проведенное исследование алгоритма показало, что при числе исходных точек $2 \cdot 10^4$ время его работы становится достаточно ощутимым — около 5 сек., а при $2 \cdot 10^5$ точек время работы составляет около 100 сек. Исследование этого и других описанных ниже алгоритмов проводилось на ПК с процессором AMD Athlon XP 1700+, ОЗУ 512 МБ с ОС Windows 2000. Результаты исследования представлены на рис. 1 в виде зависимости времени обработки совпадающих точек от их числа (пунктирная линия). Учитывая, что реальные данные могут

включать несколько миллионов точек, необходим более эффективный алгоритм.

Для повышения вычислительной эффективности алгоритма предложено использовать пространственную индексацию. Показано, что наиболее подходящим методом, не требующим полной перестройки индексной системы, является *метод сетки*. Этот метод предполагает разбиение исходной области на сетку малых квадратов (ячеек). Создается матрица индексации, в которой каждая ячейка содержит индексы соответствующих ей точек. При обработке совпадающих точек их индексы удаляются из соответствующих ячеек, а при формировании новой — добавляются в нужную ячейку.

Первым шагом работы алгоритма является формирование индексной структуры. Для каждой точки определяются индексы ячейки, в которую эта точка попадает. В список этой ячейки заносится указатель на текущую точку. По завершению первого этапа каждая ячейка вспомогательной сетки будет содержать список попадающих в нее точек.

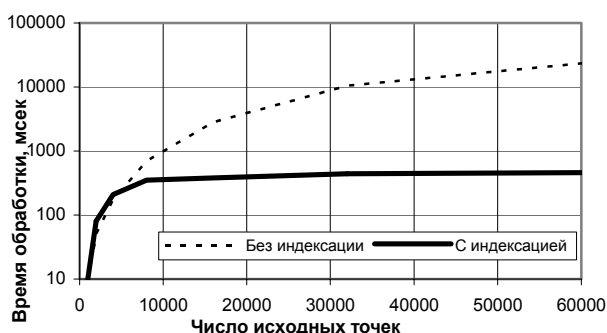


Рис. 1. Зависимость времени обработки совпадающих точек от числа исходных точек

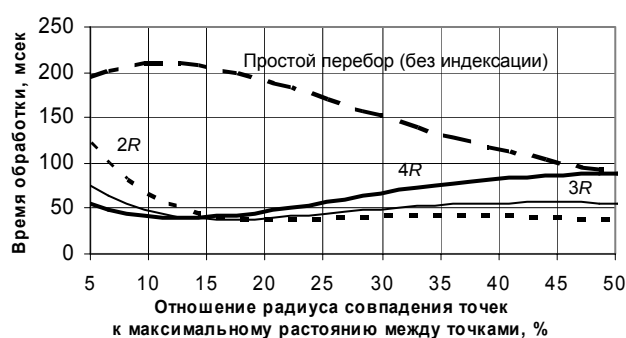


Рис. 2. Зависимость времени обработки совпадающих точек от радиуса совпадения

На втором шаге выполняется поиск точек, удаленных от текущей не далее заданного расстояния. Этот шаг выполняется для всех необработанных исходных точек. Очевидно что, размер ячейки влияет на вычислительную эффективность алгоритма. Проведенное исследование показало, что наименьшее время обработки для практически значимых случаев (когда отношение радиуса совпадения точек к максимальному расстоянию между точками меньше 15 %) получается, когда размер ячейки составляет $4R$, где R — радиус совпадения точек. На рис. 2 показана зависимость времени обработки совпадающих точек от радиуса совпадения с использованием сетки с различным размером ячейки, а также для сравнения с использованием простого перебора (без индексации). На рис. 1 сплошной линией показана зависимость времени обработки совпадающих точек от числа исходных точек с использованием индексации с размером ячейки $4R$. Например, для $8 \cdot 10^3$ точек время обработки сокращается в 2 раза, а для $6 \cdot 10^4$ — почти в 60 раз.

Если на этапе восстановления геополя используется локальный интерполятор, то также необходимо решать задачу поиска ближайших точек. Задача поиска осложняется тем, что пользователем для поиска могут задаваться разные

условия: поиск в заданном радиусе или поиск заданного числа ближайших точек.

В первом случае для исключения появления неоцененных зон дополнительно должно быть наложено ограничение на минимальное число ближайших точек. Предложен адаптивный алгоритм поиска ближайших точек, использующий пространственное индексирование методами kd-дерева и сетки. Адаптивность алгоритма проявляется в том, что при заданном радиусе поиска используется индексирование методом kd-дерева, а при заданном числе ближайших точек — методом сетки. Модификация метода kd-дерева заключается в использо-

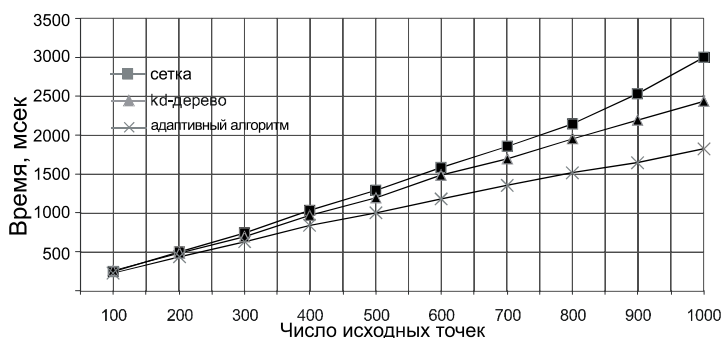
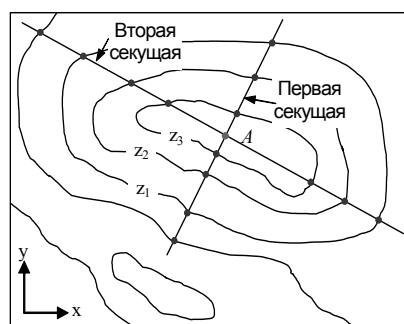


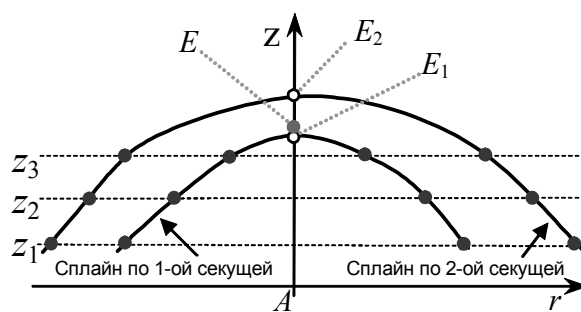
Рис.3 Зависимость времени поиска ближайших точек от числа исходных точек

вании вспомогательной индексной сетки для случаев, когда необходимо расширять радиус поиска для исключения появления неоцененных зон. Адаптивность алгоритма также проявляется в том, что эта вспомогательная структура строится только при появлении первой неоцененной зоны. На рис. 3 приведены результаты исследования вычислительной эффективности этого алгоритма. Анализ результатов показал, что в тех случаях, когда возникают неоцененные зоны, время поиска сокращается в среднем на 15%-20% по сравнению с использованием метода kd-дерева и до 40% с использованием метода сетки.

Для восстановления геополя по изолинейным данным предлагается новый метод, получивший название «метод плавающих секущих». Суть метода видна из рис. 4 и заключается в построении секущих, проходящих через точку A , в которой необходимо восстановить значение геополя. Первая секущая строится в направлении ближайшей изолинии, а следующие секущие — через равные углы (на рис. 4а показан случай с двумя секущими). По-



а)



б)

Рис. 4. Схема метода плавающих секущих

строенные секущие будут пересекать изолинии. На основе значений геополя в ближайших точках пересечений с помощью одномерной сплайн-интерполяции рассчитывается значение геополя для каждой секущей (на рис. 4б это E_1 и E_2). Далее вычисляется общее значение геополя E по всем секущим с использованием метода обратных взвешенных расстояний (используются расстояния до ближайшей изолинии). Восстановленная этим методом поверхность является глад-

кой. Восстановленная этим методом поверхность является глад-

кой, а области плато, характерные для других методов, отсутствуют. Показано, что использование одномерной интерполяции для восстановления функции двух переменных позволило упростить метод и повысить его вычислительную эффективность по сравнению с методами, использующими двумерную интерполяцию.

Наиболее трудоемкой частью метода является поиск ближайших изолиний. Предложено увеличить вычислительную эффективность такого поиска за счет использования многослойной пространственной индексации. Последняя сочетает в себе достоинства квадродеревьев и сеток и позволяет быстрее пробегать пустые ячейки индекса при поиске ближайшей изолинии, если при поиске переходить от более детального индексного слоя к менее детальному. Разработан алгоритм поиска ближайшей изолинии с использованием многослойной индексации.

Шаг 1. Определить ячейку наиболее детального слоя, содержащую расчётную точку.

Шаг 2. Если список этой ячейки не пуст, перейти к шагу 7.

Шаг 3. Если рассматриваемая область по горизонтали захватывает только один столбец ячеек, нужно захватить ещё один столбец (слева или справа), ближайший к расчётной точке.

Шаг 4. Если рассматриваемая область по вертикали захватывает только одну строку ячеек, нужно захватить ещё одну строку (сверху или снизу), ближайшую к расчётной точке.

Шаг 5. Если рассматриваемая область не пуста, перейти к шагу 7.

Шаг 6. Перейти к менее детальному индексу, продолжить работу с шага 2.

Шаг 7. Отбросить пустые ячейки.

Шаг 8. Если возможно, перейти к более детальному индексу и продолжить с шага 7, иначе перейти к шагу 9.

Шаг 9. Выбрать из самого детального индекса множество ячеек, частично или полностью покрываемых кольцом с центром в расчётной точке и радиусами такими, что ограничивающие окружности кольца касаются ближайшей к расчётной точке ячейки из множества, полученного ранее.

Шаг 10. Отбросить пустые ячейки.

Шаг 11. Выбрать в оставшихся ячейках ближайший отрезок.

Проведенные исследования показали (на рис. 5 приведена часть результатов, пунктирной кривой показаны результаты, полученные этим же самым методом, но без пространственной индексации, под числом ячеек понимается число ячеек восстановленной регулярной сети), что применение этого алгоритма увеличило вычисли-

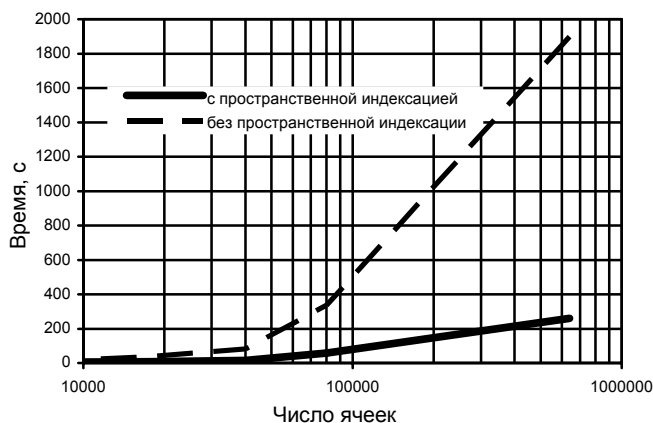


Рис. 5. Зависимость времени восстановления геополя по изолинейным данным от числа ячеек

тельную эффективность метода плавающих секущих в 5-20 раз в зависимости от исходных данных и параметров рассчитываемой регулярной сети. Получены результаты исследования точности восстановления геополя предложенным методом, методом обратных взвешенных расстояний и методом триангуляции. Оказалось, что относительная ошибка восстановления геополя предложенным методом при заданной доверительной вероятности 0,95 не превышает 0,5%. Это ниже, чем относительные ошибки для других названных методов.

Описываются алгоритмы, основанные на известных методах анализа двумерных геополей, и алгоритмы, используемые для визуализации геополей: формирование карт изолиний и изоконтуров, формирование профилей и т.д.

Предложен подход к редактированию цифровых моделей геополей, представленных регулярными сетями. Его суть заключается в использовании операций *деформации поверхности* в некоторой области, определенной пользователем на карте с помощью специальных инструментальных средств. Показано, что этот подход может быть использован при решении задачи восстановления геополя на стадии пост-обработки в тех случаях, когда исходные данные слабо формализованы и поэтому не могут быть использованы в существующих методах восстановления.

Отметим, что при заданной доверительной вероятности 0,95 относительные ошибки результатов всех вышеописанных численных экспериментов для исследования вычислительной эффективности предложенных алгоритмов находятся в пределах 3%-5%.

В четвертой главе рассматриваются программные средства инструментальной ГИС и созданное на ее основе и апробированное при решении практических задач семейство проблемно-ориентированных ГИС.

Описывается обобщенная структура инструментальной ГИС, получившей название SurfMapper. Основу этой ГИС составляет *ядро универсальной ГИС* MapInfo Professional 4.x/5.x/6.x/7.x, которое включает средства для визуализации картографической информации, редактирования картографической информации, СУБД и механизм построения запросов, а также средства пространственного анализа простых пространственных объектов. На *верхнем уровне* разработанного ПО находится интерфейсный модуль, реализованный на специализированном языке MapBasic универсальной ГИС MapInfo Professional. Основное назначение этого модуля — расширение интерфейса пользователя ГИС MapInfo Professional с помощью дополнительных меню, панелей инструментов и окон. Этот модуль также позволяет выполнять адаптацию системы SurfMapper при создании на ее основе проблемно-ориентированных ГИС.

Средний уровень состоит из модулей, решающих конкретные задачи анализа геополей. Реализация модулей этого уровня также выполнена с помощью языка MapBasic. На рис. 6 показаны лишь основные модули этого уровня (всего их 70). *Нижний уровень* включает функциональные модули, реализующие операции анализа геополей, требующие значительных вычислительных ресурсов, модули, реализующие сложные пользовательские интерфейсы и библиотеку трехмерной визуализации геополей. Библиотеку smAPI можно представить в виде двух слоев.

Первый слой — модули для работы с цифровыми моделями геополей (регулярными и триангуляционными сетями). Эти модули реализуют низкоуровневые функции для работы с моделями: создание, получение и изменение основных параметров моделей.

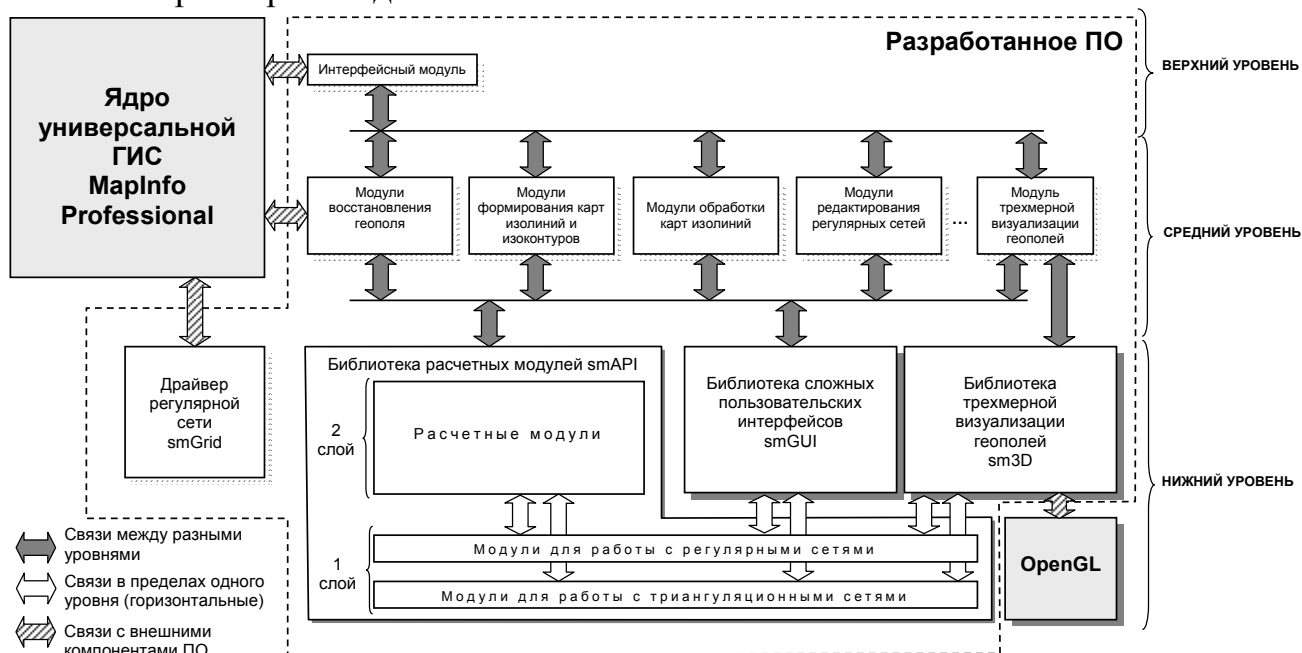


Рис. 6. Обобщенная структура ПО инструментальной ГИС

Ко второму слою относятся расчетные модули. Эта библиотека была реализована в среде Microsoft Visual C++ 6.0. Библиотека smGUI сложных пользовательских интерфейсов содержит сложные интерфейсы пользователя (окна, иконки и другие ресурсы). Она smGUI была реализована в среде Borland Delphi 7.0. Библиотека трехмерной визуализации геополей использует известную графическую библиотеку OpenGL. Для визуализации регулярных сетей используется драйвер smGrid, позволяющий ядру ГИС MapInfo Professional визуализировать эти сети в виде растров с градиентной раскраской. Драйвер smGrid и библиотека sm3D были реализованы в среде Microsoft Visual C++ 6.0

Предлагается технология создания проблемно-ориентированных ГИС на основе инструментальной ГИС SurfMapper. Предложены принципы, положенные в основу этой технологии. Описано семейство проблемно-ориентированных ГИС, разработанных по предложенной технологии. Кратко рассмотрим эти ГИС.

1. Проблемно-ориентированная ГИС для построения структурных карт и геологических разрезов нефтегазовых месторождений позволяет решать задачи: восстановление кровли геологических пластов по данным исследований в скважинах; восстановление кровли геологических пластов по картам изолиний; построение карт изолиний и изоконтуров параметров геологических пластов; построение геологических разрезов и др.

2. Проблемно-ориентированная ГИС для анализа результатов гидрогеохимических исследований подземных водных объектов позволяет решать задачи: тематическая визуализация данных гидрогеохимических исследований на цифровой карте; восстановление геополей содержания различных химических эле-

ментов в водных объектах по данным точечных проб; построение карт изолиний и изоконтуров содержания химических элементов; построение профилей и т.д.

3. Проблемно-ориентированная ГИС для подсчета запасов нефтегазовых месторождений, получившая название «Баланс-Гидродинамик», позволяет решать задачи: восстановление

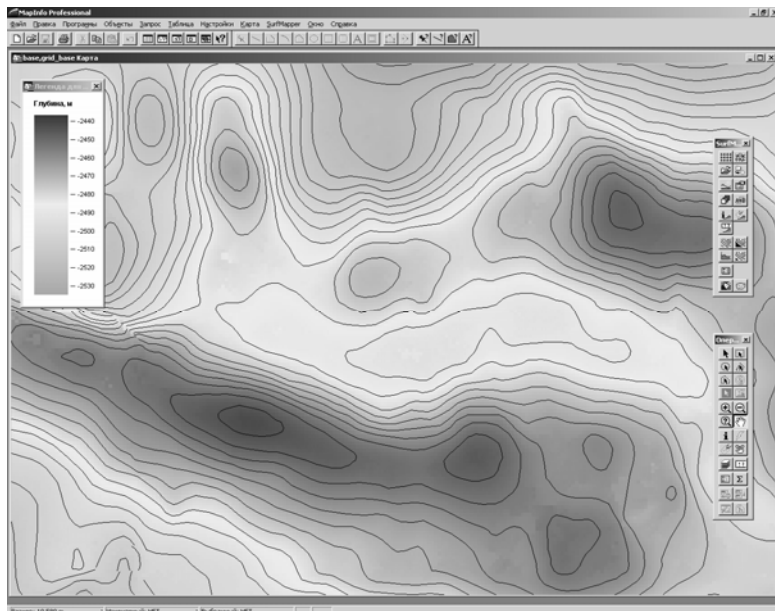


Рис. 7. Карта изолиний кровли продуктивного пласта

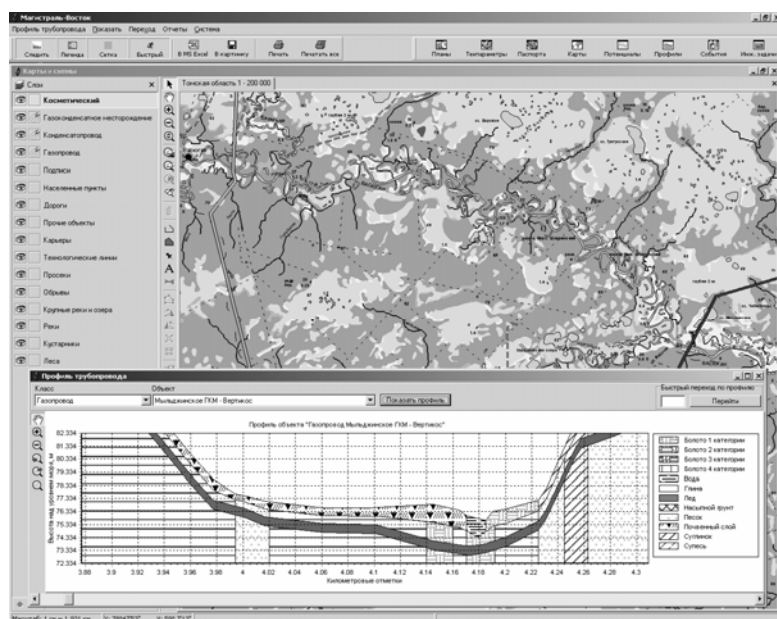


Рис. 8. Профиль трубопровода

изоконтуров гамма-фона и др.

5. Геоинформационная подсистема для анализа двумерных геополей в составе корпоративной геоинформационной системы управления производством для ОАО «Востокгазпром», получившая название «Магистраль-Восток». Эта подсистема включает в качестве ядра библиотеку картографических функций MapInfo MapX. Средства подсистемы использовались для решения задач построения профилей трубопроводов на основе карт рельефа местности. В каче-

стве примера показана карта, созданная средствами этой системы. На ней отображены изолинии кровли продуктивного пласта Кулгинского месторождения Томской области.

4. Проблемно-ориентированная ГИС для построения карт радиационного гамма-фона позволяет решать задачи: тематическая визуализация данных радиационного мониторинга на цифровой карте, полученных мобильной радиологической лабораторией с помощью GPS-приемника и гамма-спектрометра; восстановление поля гамма-фона; построение карт изолиний и

стве примера на рис. 8 показаны окно с картой, на которой отображены трубопроводы, и окно профиля трубопровода, построенного с использованием цифровой модели рельефа.

Результаты решения практических задач, полученные с помощью проблемно-ориентированных ГИС, подчеркивают практическую значимость работы и подтверждают эффективность созданных цифровых моделей геополей, методов, алгоритмов и программных средств для анализа геополей.

В заключении приведены основные выводы и результаты диссертационной работы.

В приложение вынесены акты о внедрении полученных результатов.

Основные выводы и результаты

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные научные и практические результаты.

1. Проведен анализ проблемы автоматизации задач анализа двумерных геополей, позволивший сделать вывод об актуальности проблемы создания инструментальной ГИС для решения таких задач.

2. Предложена концепция построения инструментальной ГИС, основанная на использовании в качестве ядра системы современной универсальной ГИС. Разработана трехуровневая структура инструментальной ГИС.

3. Предложен многоэтапный способ восстановления двумерных геополей по точечным данным, включающий предварительную обработку исходных данных и позволяющий тем самым повышать точность восстановления геополей.

4. Предложен адаптивный алгоритм поиска ближайших точек, отличающийся от известных использованием комбинированием методов kd-дерева и сетки, использованных при пространственном индексировании.

5. Разработаны метод плавающих секущих и реализующий его алгоритм, предназначенные для восстановления двумерных геополей по изолинейным данным. Предложен алгоритм поиска ближайших изолиний, использующий многослойное пространственное индексирование. Получены результаты исследования точности восстановления и вычислительной эффективности метода и этих алгоритмов.

6. Предложен подход к редактированию моделей геополей, представленных регулярными сетями, позволяющий уточнять результаты восстановления геополя на стадии пост-обработки.

7. Разработана структура ПО и на основе предложенных алгоритмов созданы программные средства инструментальной ГИС, получившей название SurfMapper.

8. Предложена технология создания проблемно-ориентированных ГИС на основе инструментальной ГИС SurfMapper. Проведена апробация этой технологии, при этом создано семейство таких ГИС.

9. Проведена апробация разработанных инструментальной ГИС SurfMapper и проблемно-ориентированных ГИС при решении ряда практически

важных геологических и экологических задач, а также задач в нефтегазовой отрасли.

10. Осуществлены четыре внедрения разработанного алгоритмического и программного обеспечения системы SurfMapper, о чем получены соответствующие акты.

Основные публикации по теме диссертации

1. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. и др. Геоинформационная система для решения задач гидрогеологии // Информационные технологии, 1997, №4, С. 29–33.

2. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. и др. Приложения в среде ГИС MapInfo для геологических и экологических исследований // Вестник MapInfo, 1997, №2, С. 34–38.

3. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. и др. Система построения тематических карт в среде ГИС MapInfo // В кн: Материалы Международной конференция ИНТЕРКАРТО 4 «ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий», Барнаул: Изд-во Алтайского гос. ун-та, 1998, С.147–152.

4. Zakharova A., Kovin R., Markov N. ets. GIS-tools for geoecology and hydrogeology // Proceedings of the 4th International symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, - Boston (Danvers), CEEST, Massachusetts, USA, the Lowell vol. II, 1998, pp. 1601–1603.

Ковин Р. и др. ГИС-средства для геоэкологии и гидрологии // Труды 4-го Международного симпозиума по природосберегающим геотехнологиям и глобального устойчивого развития.

5. Zakharova A., Kovin R., Markov N. ets. GIS-technologies for geoecology and hydrogeology // Proceedings Of Korus'98 The Second Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, — Tomsk: TPU, 1998, p. 251.

Ковин Р. и др. ГИС-технологии для геоэкологии и гидрологии // Труды 2-го Российско-корейского международного симпозиума по науке и технологии KORUS'98.

6. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. и др. Геоинформационный подход к автоматизации процессов контроля недропользования // В кн.: Трансфертные технологии в информатике. — Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 1999, вып.1, С. 61–63.

7. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. и др. Математический аппарат для построения тематических карт при изучении и использовании недр // В кн.: Трансферные технологии в информатике, вып.1, Томск: Изд-во ТПУ, 1999, С. 87–94.

8. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. и др. ГИС-технология для ландшафтно-экологических исследований // Материалы международной конференции "ГИС для оптимизации природопользования в целях устойчивого развития территорий (Интеркарто-5)", Якутск: ЯГУ, 1999, С. 36–45.

9. Ananina V.P., Kovin R.V., Markov N.G. ets. GIS for decision of water resources monitoring tasks and industrial regions ecological situation analysis // Mate-

rials of International Conference “Anniversary scientific conference 50 years faculty of hydrotechnics”, Sofia, Bulgaria, ACEGU, v. I, 1999, pp. 19–26.

Ковин Р.В. и др. ГИС для решения задач мониторинга водных ресурсов и анализа экологической обстановки промышленных регионов

10. Ковин Р.В., Марков Н.Г. Цифровые модели рельефов в среде ГИС MapInfo Professional // Труды Международной научно-практической конференции «Геоинформатика-2000». — Томск: Изд-во Томского гос. ун-та, 2000, С. 161–170.

11. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н.Г. Возможности ГИС-технологий для решения задач природопользования // Материалы франко-российского семинара «Загрязнение окружающей среды и управление природными ресурсами», Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2000, С. 220–225.

12. Ermashova N.A., Kovin R.V., Markov N.G. ets. Underground water quality control with use of geoinformation technologies // Proceedings of the 5th International symposium on environmental geotechnology and global sustainable development, — Belo Horizonte — Minas Gerais/Brazil, 2000, pp. 143–146.

Ковин Р.В. и др. Контроль качества подземных вод с использованием геоинформационных технологий // Труды 5-го Международного симпозиума по природосберегающим геотехнологиям и глобального устойчивого развития.

13. Kovin R.V., Napryushkin A.A., Markov N.G. ets. Vector-raster GIS for detection and assessment of urban pollution zones with use of aerospace monitoring data // Proceedings of 4-th EC conference - Historical Cities Sustainable Development: "The GIS as Design and Management Support" — HISTOCITY 2000, Italy, European Committee, 2000, pp. 156–162.

Ковин Р.В. и др. Векторно-растровая ГИС для обнаружения и оценки зон загрязнений городов по данным спутникового мониторинга земной поверхности // Труды 4-ой конференции ЕС Устойчивое развитие исторических городов «ГИС как средство поддержки проектирования и управления».

14. Захарова А.А., Ковин Р.В., Марков Н. Г. Геоинформационные системы и технологии в геологии: тенденции развития, опыт разработки и перспективы // В кн. «Инновационные методы и технологии нефтегазопромысловых работ и возможные пути их реализации в юго-восточных районах Западной Сибири», Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2000, С. 75–87.

15. Zakharova A., Kovin R., Markov N., Spitsyn V. Geoinformation system for modeling processes of surface waters infiltration into geological medium // Proceedings of the 4th International conference Geographic Information Science, Brno, Czech Republic, 2001, pp. 23–28.

Ковин Р. и др. Геоинформационная система для моделирования процессов инфильтрации поверхностных вод в геологическую среду // Труды 4-ой Международной конференции географических информационных наук.

16. Ковин Р.В., Кудинов А.В., Копнов М.В. и др. Корпоративная геоинформационная система для управления производством ОАО «Востокгазпром» // Материалы 3-й Межрегиональной научно-практической конференции «Газораспределительные системы. АГНКС. АГЗС», Томск: Изд-во ТМДИ, 2003, С. 112–119.

17. R.V. Kovin, A.V. Kudinov, N.G. Markov ets. Designing production management systems of oil-and-gas holding companies // Proceedings of KORUS 2004: 8th Korea-Russia International Symposium of Science and Technology, Tomsk, TPU, 2004, vol. I, pp. 91–95.

Р.В. Ковин и др. Построение систем управления производством нефтегазовых холдингов // Труды 8-го Российско-корейского международного симпозиума по науке и технологии KORUS 2004.

18. Ковин Р.В., Копнов М.В. Использование алгоритмов геометрического поиска при восстановлении геополей // Материалы X Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2004, С. 158–160.