

На правах рукописи

Работа выполнена в Западно-Сибирском филиале Института Геологии Нефти и Газа СО РАН.

ПЛАВНИК АНДРЕЙ ГАРЬЕВИЧ

Научный руководитель: доктор геолого-минералогических наук,
профессор А. Р. Курчиков.

**АЛГОРИТМИЗАЦИЯ
ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ЗАДАЧАХ, СВЯЗАННЫХ С КАРТОПОСТРОЕНИЕМ**

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор А.М. Волков;
кандидат технических наук
М.Г. Латфуллин.

Ведущая организация: ЗАО Тюменский нефтяной научный центр
(г. Тюмень).

Специальность: 25.00.35 – «Геоинформатика»

Защита диссертации состоится «28» декабря 2004 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.273.05 при Тюменском государственном нефтегазовом университете по адресу: 625000, Тюмень, ул. Володарского, 56

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Тюменского государственного нефтегазового университета

Автореферат разослан «27» ноября 2004 г.

Тюмень - 2004

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор геолого-минералогических наук,
профессор

А. А. Дорошенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Построение карт было и остается одним из основных инструментов при решении многих геологических задач. С развитием вычислительной техники эта работа была автоматизирована одной из первых. К настоящему времени существует множество программных продуктов, специализирующихся как на построении карт, так и включающих в себя картопостроение одним из модулей. При этом используется большое количество различных методов, отличающихся подходами, вычислительной эффективностью, управляющими параметрами и адаптированностью к решению вопросов геологического картирования.

В основном, роль вычислительных средств сводится к аппроксимации данных, а проблема структурирования информации об общей геологической задаче, технологии ее решения, месте конкретной карты в этой технологии, методах и параметрах ее построения и хранения возлагается на пользователя.

При решении единичных задач эти особенности компьютерной автоматизации не очень обременительны. Но в случае необходимости постоянного ведения задач, связанных с большим объемом картопостроения или с периодическим перестроением карт, например, при появлении новой информации, проблемы организации и хранения технологической информации становятся значительными.

Данные проблемы характерны для широкого круга геологических задач, например:

- при оценке и последующей переоценке ресурсов полезных ископаемых, требующих построения большого числа взаимосвязанных карт;
- при выполнении структурных построений по нескольким горизонтам;
- при выполнении работ с многовариантной картографической обработкой большого объема разнотипных и недостаточно точных данных, в частности, при анализе качества гидрохимической информации.

Таким образом, задачи создания и совершенствования программных продуктов, позволяющих пользователю не только строить карты, но и настраивать, хранить и корректировать ее взаимосвязи с другими объектами технологической цепочки в настоящее время являются актуальными.

Цель работы - разработка программных средств и подходов, обеспечивающих автоматизацию решений геологических задач, связанных с картопостроением, технология которых определяется пользователем в зависимости от целей задач, имеющихся данных, а также его представлений о модельных свойствах изучаемых объектов, приемлемости используемых методов и оптимальности последовательности действий.

Задачи исследований

- обосновать выбор методов компьютерного картопостроения, в максимальной мере обеспечивающих реализацию модельных представлений о закономерностях пространственного изменения параметров геологических объектов и их взаимосвязей.
- осуществить разработку дополнительных и совершенствование имеющихся алгоритмов автоматизированного построения карт с учетом особенностей геологических задач, решение которых недостаточно эффективно или трудно выполнимо существующими средствами.
- определить основные геоинформационные элементы технологии решения комплексных геологических задач, связанных с картопостроением, разработать методы интерфейсного обеспечения их определения, создания и хранения и, на этой основе, автоматизировать получение конечных результатов при изменении исходных данных, отдельных технологических составляющих или их взаимосвязей.

Научная новизна и личный вклад автора. В работе впервые осуществлено обобщение математической постановки вариационной задачи картопостроения на основе аппроксимации бикубическими сплайнами. Разработаны новые методы, обеспечивающие необходимую детальность и точность построения карт при существенной неоднородности размещения фактических данных и ограниченности ресурсов вычислительной техники. Впервые решена задача моделирования поверхностей с разрывными нарушениями с использованием сплайнов на регулярных прямоугольных сетках, на основе их разномасштабной композиции в окрестности разломов. Предложены новые элементы решения задачи численного интегрирования функций двух переменных, аппроксимированных бикубическими сплайнами. Новизна работы заключается также в реализации специализированного геоинформационного объекта – иерархии технологических элементов, систематизации и формализации параметров их характеризующих, методов построения этих элементов и их взаимосвязей, что обеспечило, с одной стороны, создание удобного для пользователей интерфейсного обеспечения и, с другой, относительную простоту разработки программных средств и наращивание их функциональных возможностей. Автор принимал непосредственное участие в постановке задач, разработке методов их решения и последующей программной реализации.

Защищаемые положения:

1. Метод обобщенной сплайн-аппроксимации, в наибольшей мере обеспечивает реализацию модельных представлений о закономерностях пространственного изменения параметров геологических объектов, что обусловлено возможностью учета косвенной информации по множеству

показателей и использованием хорошо изученного аппарата уравнений математической физики.

2. Реализация в программном комплексе GST (Medium) обобщенной постановки вариационной задачи картопостроения – общего вида локальных и глобальных уравнений, с детализацией возможных типов входящих в них параметров, обеспечивает эффективное решение широкого класса геологических задач.

3. Методы композиционного построения детальных карт геологических параметров, согласованных по коэффициентам аппроксимирующего сплайна в смежных зонах, обеспечивают эффективное решение задач в условиях неоднородности размещения фактических данных и ограниченности ресурсов вычислительной техники, с контролем точности конечных результатов на промежуточных этапах вычислений.

4. Принципы интерфейсного обеспечения, заключающиеся в формализации основных объектов - таблицы, покрытия, грида, папки и их иерархии, разработка для них соответствующих методов построения и визуализации, обеспечивают возможность создания эффективных программных средств по автоматизации решения геологических задач, связанных с картопостроением.

Практическая значимость работы определяется повышением эффективности решения комплексных геологических задач, связанные с картопостроением, что обусловлено следующими особенностями разработанного программного продукта:

- Возможностью конструирования технологических цепочек для широкого круга реальных геологических задач.

- Архивизацией технологии решения геологических задач, обеспечивающей полное сохранение информации о методах и параметрах выполняемых построений.

- Автоматизацией пересчета конечного результата (и, при необходимости, всех промежуточных этапов) при внесении изменений в исходные данные.

- Сохранением технологии решения в виде «шаблона», доступного для использования в аналогичных задачах.

- Общностью математической постановки вариационной задачи картопостроения, что обеспечивает возможность вычислительной и интерфейсной реализации широкого спектра представлений о закономерностях изменения картируемых параметров и их связей с другими свойствами изучаемых геологических объектов.

- Единством методической основы решения задач построения карт, в том числе для моделирования поверхностей с дизъюнктивными нарушениями и для выполнения композиционных построений разномасштабных карт и карт, имеющих смежные области.

- Наличием встроенных специальных средств для решения конкретных задач, например, подсчета запасов углеводородов в залежах.

Реализация работы. Представленные в работе алгоритмы и подходы являются составной частью программного комплекса GST (Medium), который используется во многих геологических и нефтяных организациях и компаниях Тюменской области, а также других регионов России. С его помощью проведена оценка запасов Иусского, Котыльинского, Западно-Талинского, Восточно-Каменного, Южно-Хангакуртского, Сергинского, Западно-Яганокуртского и других месторождений нефти и газа. Выполняются построения региональных структурных карт. Комплекс активно использовался в решении задач оценки потенциальных ресурсов нефти и газа в неокомских отложениях Среднего Приобья (2004г.), а также при оценке гидроминеральных ресурсов апт-сеноманских и неокомских отложений на территории ХМАО (2002 г.). Разработанные методы и программные средства использованы в учебных курсах «Геологическое картирование», «Моделирование поисково-разведочного процесса» и «Подсчет запасов нефти и газа на ЭВМ» обучения студентов специальности «Геология нефти и газа» ТюмГНГУ.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на IV и V научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов ЗапСибНИГНИ (Тюмень, 1979, 1981), II и VI конференциях ВМО «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Западно-Сибирской плиты и ее складчатого обрамления» (Тюмень, 1980, 1987), на всесоюзном совещании «Гидрогеохимические поиски месторождений полезных ископаемых» (Томск, 1986), на сибирской конференции «Методы сплайн-функций» (Новосибирск, 2001), на Всероссийской научной конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна» (Тюмень 2000г.), на научно-практических конференциях «Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО» (Ханты-Мансийск, 2001 и 2003 гг.), «Нефть и газ Западной Сибири» (Тюмень, 2003 и 2004 гг.), на международной конференции по вычислительной математике МКВМ - 2004 (Новосибирск, 2004 г.).

Фактический материал, методы исследования. Основным материалом исследования в работе являются методы компьютерного картопостроения и существующие программные средства, их реализующие. Вместе с тем, в исследованиях использовались данные, характеризующие как на региональном, так и на локальном уровне широкий спектр свойств геологических объектов Западно-Сибирского бассейна, в частности геометрию пластов, физико-химические свойства отложений, состав насыщающих флюидов, геотемпературный режим недр. Объем обрабатываемой информации по некоторым видам данных, например, сейсмических, достигал нескольких сотен тысяч определений.

Для моделирования свойств картируемых геологических параметров активно применялись методы аппроксимации сплайнами. В исследованиях использовались методы численных экспериментов для оценки вычислительной эффективности и достоверности существующих и разработанных в работе подходов к задаче картопостроения. Обоснование выбора методов компьютерного картопостроения и их совершенствование осуществлено на основе анализа и обобщения особенностей постановки геологических задач и математических методов их решения.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 22 работы.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы - 180 страниц, рисунков - 28, список литературы - 93 наименования.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю, доктору г.-м. наук А.Р. Курчикову за постоянную поддержку и внимание к работе.

За большое содействие на разных этапах исследований автор искренне признателен своим коллегам М.В. Андреевой, Н.Ю. Галкиной, М.В. Ицкович, А.В. Коростелеву С.В. Кудрявому, Т.П. Митрохиной, Г.С. Панченко, Л.Д. Полужниковой, М.А. Пономаревой, В.А. Саитову, А.В. Степанову, С.В. Степанову и М.Е. Тепляковой. Особую признательность автор выражает Б.П. Ставицкому за многолетнее сотрудничество, помощь и поддержку в подготовке работы.

Автор искренне благодарен В.А. Волкову, М.А. Волкову, В.Н. Гончаровой, В.Ф. Гришкевичу, В.Е. Касаткину, В.Л. Мирошниченко, Г.И. Плавнику, С.А. Предеину, В.И. Пяткову, А.А. Сидорову, А.Н. Сидорову, И.В. Сидоровой, С.В. Торопову, Н.И. Хорошеву, М.С. Шутову и В.М. Яковлеву за плодотворное обсуждение проблемных вопросов и методов их решения.

Важную роль сыграли критические замечания, высказанные при обсуждении работы на разных этапах ее выполнения А.Э.Конторовичем, И.И.Нестеровым и В.И. Шпильманом.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 проводится анализ современных средств компьютерного картопостроения с позиции их применимости для решения широкого круга геологических задач, вычислительной эффективности используемых алгоритмов, предоставляемых средств создания моделей, адекватных представлению пользователя о физической природе объектов, возможности и удобства управления технологией решения.

В настоящее время используется большое число различных алгоритмов автоматизированного построения карт - ближайшего соседа, триангуляционной линейной интерполяции, инверсных расстояний,

радиальных базисных функций, крайгинг и кокрайгинг, минимума кривизны, обобщенный метод сплайн-аппроксимации, искусственных нейронных сетей и другие. Наблюдается большая вариация заложенных в методы моделей поведения картируемой функции, в которых используются различные управляющие параметры, отличающиеся как разнообразием их смыслового содержания, так и их количеством. Каждый из методов имеет определенные преимущества и недостатки.

Программные средства, включающие в свой арсенал методы картопостроения, также характеризуются большим количеством и разнообразием. В геоинформационных системах функции картопостроения являются достаточно второстепенными и, соответственно, реализованы, как правило, в минимальном объеме. В специализированных программах основной упор делается на предоставлении пользователю возможности выбора из широкого спектра современных методов гридинга. При этом, однако, место картопостроения в технологии решения геологических задач или достаточно жестко обусловлено (как это имеет место в интегрированных системах подсчета запасов) или полностью не определено, как в программе Surfer, имеющей общинженерную направленность.

В главе 2 обосновываются преимущества метода обобщенной сплайн-аппроксимации в реализации представлений о закономерностях пространственного изменения параметров геологических объектов, и осуществляется его обобщение и развитие, направленные на расширение круга решаемых задач и повышение эффективности алгоритмов.

В практике геологоразведочных и нефтегазопромысловых работ ситуация с хорошей обеспеченностью данными скорее является редким исключением. В этих условиях проблема отображения закономерностей изменения рассматриваемого параметра адекватного действительности, преобразуется в задачу установления этих закономерностей. В такой постановке задача выходит за рамки анализа формализуемых критериев применимости методов картопостроения, поскольку вопрос преобразуется к обоснованию строения и свойств геологических объектов.

Особенно продуктивен при этом совместный анализ пространственных соотношений нескольких параметров, характеризующих изучаемые геологические объекты. Среди множества современных методов картопостроения на сегодняшний день лишь два из них реально позволяют использовать косвенную информацию – это метод обобщенной сплайн-аппроксимации и кокрайгинг.

Преимущества первого метода обусловлены возможностью учета множества косвенных данных, расположение которых не взаимосвязано с точками определения картируемого параметра; незначительным влиянием на вычислительную эффективность количества косвенных признаков;

использованием уравнений математической физики для установления вида взаимосвязи между параметрами, физический смысл которых, в отличие от статистического характера свертки информации в кросс-вариограммах, достаточно глубоко исследован, что значительно упрощает получение ожидаемого результата.

Аппроксимация сплайнами активно применяется в геологии при решении задач компьютерного картопостроения с середины 70-х годов XX века. В результате проведенного в работе анализа выделены следующие основные элементы их постановки и решения:

- аппроксимационный подход, в котором задача изначально формулируется в вариационной постановке минимизации некоторого функционала;
- возможность одновременного восстановления нескольких поверхностей;
- использование стабилизаторов для задания общих свойств картируемой поверхности;
- введение дифференциальных операторов и применение их к описанию искомой поверхности и ее связи с известными полями;
- использование данных локально задаваемых в точках наблюдений;
- использование уравнений в частных производных, аналогичных уравнениям математической физики, описывающих свойства картируемой поверхности во всей расчетной области;
- некоторые элементы регрессионного анализа, при котором коэффициенты связи определяются одновременно с решением основной задачи картопостроения.
- аддитивное включение в функционал в принципе произвольного числа учитываемой при построении прямой и дополнительной информации, на основе приближенных условий с использованием весовых коэффициентов в качестве управляющих параметров.

В работе обосновывается возможность для каждого отдельного условия, связывающего несколько искомым (F_i) и ряд известных поверхностей (G_i), представления в виде **обобщающего уравнения**:

$$\sum_{i=1}^l L_i F_i \approx \sum_{j=1}^J \tilde{L}_j G_j$$

и вводятся понятия, детализирующие это уравнение и входящие в него параметры. Здесь L – линейный дифференциальный оператор второго порядка, определяемый соотношением

$$L(F) = a_0 F + a_1 F_x + a_2 F_y + a_3 F_{xy} + a_4 F_{xx} + a_5 F_{yy}$$

a_0 - a_5 – параметры оператора,

Уравнение называется **локальным**, если оно определяется на ограниченном числе точек наблюдения $\{x_m, y_m\}$. Если предполагается

выполнение данного уравнения во всей или части области решения задачи, то такое уравнение называется **глобальным**.

Локальное уравнение входит в функционал задачи в виде суммы квадратов невязок левой и правой части в точках наблюдений:

$$\rho_L \sum_m \left(\sum_{i=1}^l L_i F_i - \sum_{j=1}^J \tilde{L}_j G_j \right)_{x,y}^2$$

Для глобальных уравнений используется интегральный аналог

$$\rho_G \iint_{\Omega} \left(\sum_{i=1}^l L_i F_i - \sum_{j=1}^J \tilde{L}_j G_j \right)^2 dx dy$$

В отличие от **левосторонних** (L_i) операторов в качестве параметров **правосторонних** операторов (\tilde{L}_j) допустимо использование неизвестных переменных, определяемых одновременно с решением задачи построения карты.

Кроме описанных выше локальных и глобальных уравнений при решении задач восстановления поверхностей используются условия, названные в работе **нестрогими связями**, описываемые уравнениями с известными коэффициентами c_j и d

$$\sum_j c_j x_j - d \approx 0$$

где суммирование производится по всем неизвестным задачи x_j , включая коэффициенты сплайнов искомым поверхностей и неизвестные параметры правосторонних операторов. Также как локальные и глобальные уравнения нестрогие связи входят в общий функционал в связке с весовым коэффициентом:

$$\rho_c \left(\sum_j c_j x_j - d \right)^2$$

В ряде задач может оказаться необходимым устанавливать **строгие связи** между неизвестными, определяемые строгими равенствами

$$\sum_j c_j x_j - d = 0$$

Реализация этих условий осуществляется стандартным образом с использованием множителей Лагранжа.

На основе изложенной обобщенной постановки задачи картопостроения реализованы программные комплексы GST (Medium), в которых обеспечивается решение всего спектра геологических задач, традиционно решаемых методами, основанными на обобщенной сплайн-аппроксимации. Вместе с тем, заложенная в эти программы общность математической постановки задачи, позволяет в рамках единого интерфейса использовать достаточно абстрактные модели поведения

картируемой поверхности, вплоть до решения уравнений математической физики с высокой точностью.

Современная вычислительная техника предоставляет пользователям очень мощные средства и возможности. Однако, как показывает практика, ресурсов компьютерной техники никогда не хватает для решения всех имеющихся задач. Рост производительности компьютеров всегда приводит к постановке и решению новых задач в максимальной степени задействующих их резервы.

Региональные построения с привлечением многочисленных данных сейсмических исследований, которые располагаются с достаточно высокой плотностью и относительно равномерно на значительных территориях, являются характерным примером такой ситуации. При этом количество данных и количество узлов результирующего грида может достигать нескольких сотен тысяч. Наиболее используемым решением таких задач является деления прямоугольной области определения грида на отдельные полосы, независимый расчет карт по ним с последующей «сборкой» единого грида. Основные сложности при этом подходе заключаются в согласовании между собой результатов расчетов по отдельным полосам и обеспечении точности результирующего грида.

Для обеспечения условий гладкой «подклейки» сеточных моделей по полосам в работе используется условие согласованности коэффициентов сплайнов в смежных областях. При этом обеспечивается прямое определение коэффициентов суммарного сплайна. Соответственно, ошибки аппроксимации можно анализировать на этапе расчета по полосам и сокращать их, предпринимая специальные приемы, например, придавая больший вес данным в проблемных зонах перекрытия.

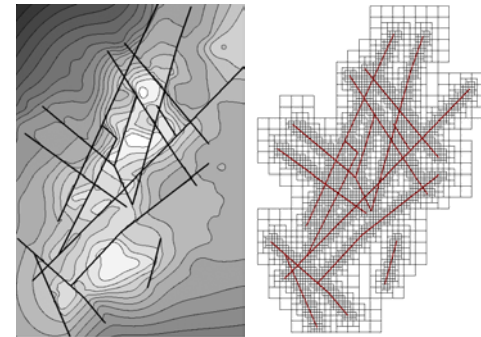
Вторая характерная ситуация встречается при наличии существенной разницы в плотности распределения фактических данных, наряду с необходимостью обеспечения высокой достоверности построений. Например, при построении по нескольким месторождениям, с учетом данных по разведочным и эксплуатационным скважинам, требуемые размеры грида могут быть весьма значительными.

Для этих задач в работе предлагается аналогичное наследование значений коэффициентов сплайна при последовательном построении карты с достаточно крупным шагом грида и детальных карт по отдельным участкам с последующей «вклейкой» их в общую карту. Осложняющим обстоятельством при этом является возможная разница в шагах сеток «склеиваемых» гридов. В этой ситуации оказывается очень важным известное свойство полиномиальных сплайнов – возможность точного описания сплайна, построенного по крупной сетке узлов, с помощью сплайнов, базирующихся на более мелких сетках. Построение

соответствующих масштабирующих соотношений для коэффициентов сплайнов реализуется достаточно просто исходя из равенств их значений и производных в узлах детализированной сетки.

Необходимой составляющей программного обеспечения, предназначенного для построения карт в рамках решения геологических задач, является возможность описания поверхностей с разрывными нарушениями, для моделирования которых фактически не используются методы, основанные на аппроксимации полиномиальными сплайнами. Вместе с тем, методы сплайн - аппроксимации предоставляют настолько мощные и разнообразные средства для моделирования гладких поверхностей, что возникает насущная задача их адаптации, доработки применительно к объектам с разрывными нарушениями с максимальным «наследованием» соответствующих возможностей.

В работе предлагается метод моделирования поверхностей с разрывными нарушениями на основе аппроксимации сплайнами, который сводится к следующему итерационному процессу. На начальном этапе проводятся расчеты для максимально возможной детальности грида, с выделением зоны (соответствующей геометрии разломов и шагу грида), внутри которой уменьшаются весовые коэффициенты на интегральные характеристики (стабилизаторы и другие). Далее осуществляется поиск решения – гладкой вклейки, в приразломной зоне (определенной на предыдущем шаге). Решение также ищется в виде сеточной модели, но с меньшим шагом грида (нами используется двукратное сгущение точек грида). Для уменьшенного шага грида определяется соответствующая



уменьшенная приразломная область, которая участвует в расчете вклейки аналогичным образом – снижением значений весовых коэффициентов. Последующие шаги повторяются до тех пор, пока детальность грида, описывающая разломную часть, не достигает требуемого уровня. На левом рисунке представлены результаты такого моделирования для достаточно сложного реального примера структурных построений. На правом – последовательность описания приразломной зоны сеточными моделями с уменьшающимся шагом.

Использование В-сплайнов в качестве базового класса функций в задачах гриддинга позволяет обеспечить высокую эффективность вычислительных алгоритмов и необходимую согласованность результатов

решения сопутствующих задач, например, интегрирования. В работе развивается подход, при котором задача численного интегрирования функции двух переменных в полигональной, многосвязной области, сводится к одномерной задаче контурного интегрирования:

$$\int_B g(x, y) dx dy = \int_{\Gamma} (\nabla_x, \vec{n}) dl$$

$$\nabla_x = (\int g(x, y) dx, 0)$$

здесь \vec{n} - единичный вектор нормали к границе Γ , l – переменная, соответствующая расстоянию между точками вдоль границы.

При использовании кубических В-сплайнов, имеющих ограниченную область определения, а также полигонального приближения границы Γ , для расчета значений функции (∇_x, \vec{n}) легко осуществимы вычислительные алгоритмы, реализующие в явном виде аналитическое решение задачи интегрирования по одной переменной. Это, в свою очередь, обуславливает эффективность метода Гаусса (формула наивысшей алгебраической точности) для последующего интегрирования по контуру. Поскольку для описания функций двух переменных используются бикубические сплайны, задача интегрирования в конечном итоге сводится к интегрированию полинома седьмой степени. При этом реализация метода Гаусса на основе полиномов Лежандра четвертой степени приводит к получению алгоритма расчета интегралов, дающего теоретически точный результат.

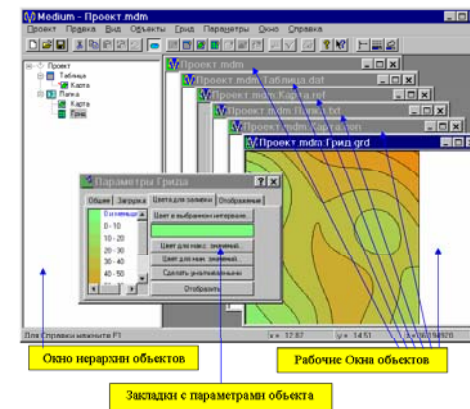
В главе 3 обосновывается необходимость включения технологии решения геологических задач в качестве запоминаемого и модифицируемого объекта программы, и предоставления пользователю возможности конструировать этот объект, устанавливая связи между отдельными элементами технологической цепочки. Такой подход нами использован при разработке программного комплекса GST (Medium).

Ключевым элементом является выделение и формализация составляющих объектов технологической цепочки, их параметров и взаимоотношений. При этом **технология** решения задач рассматривается **в качестве составного геоинформационного объекта**, который может быть представлен в виде ориентированного графа, в общем случае содержащего большое число взаимосвязанных между собой элементов. В принципе количество типов объектов, представленных в технологической цепочке, может быть сколь угодно большим.

В качестве основных в задачах картопостроения выделяются три типа объектов – таблицы, покрытия и гриды. В интерфейсном отношении очень важным является удобство структуры организации объектов. Для обеспечения решения этого вопроса в GST (Medium) добавлен объект,

играющий роль директории (папки) в файловой системе, внутри которого могут содержаться другие объекты, в том числе и объекты – папки.

Основными элементами графического интерфейса программы GST (Medium) являются окно иерархии объектов, рабочие окна объектов и диалоговое окно определения параметров их построения и отображения.



В окне иерархии объектов наглядно, в виде дерева, отображаются связи между объектами. В рабочем окне объекта осуществляется визуализация, редактирование и другие операции построения этого объекта. Вследствие большого числа используемых показателей, для упрощения доступа, параметры разделены на группы, и работа с ними осуществляется на отдельных страницах – закладках.

Множественность методов построения объекта играет очень важную роль в обеспечении возможности конструирования пользователем технологии, приемлемой для решения конкретной задачи. Так же как и количество типов объектов может быть неограниченным, так и число методов построения этих объектов не лимитируется и может добавляться по мере необходимости в новых версиях программы.

Выделение построения объекта в качестве отдельного этапа позволяет зафиксировать состояние его готовности для использования в качестве аргумента (ссылки) для построения следующего объекта технологической цепочки. Это, в свою очередь, дает возможность автоматизировать весь процесс технологии решения задачи в случае изменений в исходных данных и необходимости перестроения множества объектов. На этой же основе обеспечивается использование созданных ранее технологических шаблонов для решения аналогичных задач – исходные данные переопределяются, и осуществляется автоматизированный пересчет результирующих объектов.

В работе изложены основные свойства объектов и некоторые вопросы их функционального и интерфейсного обеспечения.

Объект «Папка» имеет две основные функции. Первая заключается в структурировании технологической цепочки. Вторая состоит в предоставлении возможности добавления текстовых комментариев, которые пользователь может набирать, а в последующем и редактировать в рабочем окне этого объекта.

Для объектов других типов имеется несколько методов построения, например, загрузка из файла или базы данных. Но основная функциональная насыщенность связана с возможностью их построения как некоторой функции от одного или нескольких других объектов (построение по ссылкам). При этом возможны различные варианты использования ссылочных объектов, что в совокупности с их множественностью определяет широкий спектр доступных результатов построений. Важное место занимает реализация в программном комплексе GST функций программируемого калькулятора, оперирующего таблицами, покрытиями и гридами, что предоставляет пользователю широкие возможности конструирования технологии комплексного и автоматизированного использования множества объектов разного типа.

В работе описываются различные варианты построения объектов разного типа (таблиц, покрытий, гридов) по ссылкам на другие таблицы, покрытия или гриды. Например, если при построении *объекта «Таблицы»* используются ссылки на карту, то в простейшем варианте в таблицу загружаются координаты точек линий карты, если кроме этого имеется ссылка на грид, то координаты используются для расчета значения грида и/или его производных в этих точках.

Специфическим, с явной геологической направленностью вариантом построения таблицы является создание таблицы запасов углеводородов в залежи. Фактически, в объекте при этом содержатся две таблицы – таблица подсчетных параметров и собственно таблица запасов, которые могут задаваться либо в виде числа, либо в виде грида. Возможны два варианта расчета – таблицы объемов и таблицы запасов.

При задании для таблицы объемов в качестве подсчетного параметра некоторого грида, описывающего произвольную функцию, результатом расчетов являются значения интегралов этой функции по подсчетным участкам, что может использоваться во многих геологических задачах, тем или иным образом связанных с оценкой ресурсов.

Одними из наиболее стандартных и востребованных функций при построении *объектов «Покровий»* являются такие простые возможности редактирования, как добавление линий, их разрезание или соединение, инвертирование направления и установка атрибутивных данных (например, числовых значений для изолиний). Данные функции достаточно очевидны, но возможны различные варианты реализации некоторых из них. В частности, в программе GST используются методы параметрических сплайнов для создания новых линий или полигонов. Это позволяет управлять конфигурацией создаваемых элементов с помощью небольшого числа узловых точек.

Специфической особенностью геологических задач, связанных с подсчетом запасов нефти и газа, является выделение областей с

различными категориями, определяющих уровень надежности оценок ресурсов. Зоны повышенной категоричности, как правило, имеют достаточно простую геометрическую форму, например, окружность или квадрат, центры которых приурочены к скважинам, а размеры фактически стандартизованы. В GST имеются соответствующие средства, обеспечивающие возможность построения этих и некоторых других простейших геометрических фигур (линий, прямоугольников и многоугольников), необходимых при создании границ категорий.

С подсчетом запасов связана также задача автоматизации определения (сборки) границ подсчетных участков, которые, как правило, выделяются по принадлежности к различным зонам (например, чисто нефтяной или водонефтяной), категориям и геометрическим характеристикам пласта (в частности, в определенных интервалах эффективных толщин). В этих условиях границы подсчетных участков представляют собой составные контуры из отдельных отрезков границ соответствующих зон, категорий или изолиний. Сборка этих границ даже в полуавтоматическом режиме, когда от пользователя требуется определить составные компоненты контуров каждого из участков, зачастую, вследствие сложности геометрии геологических объектов, представляет собой достаточно сложную в техническом отношении задачу, требующей аккуратности и значительной концентрации внимания.

Дополнительный объем функциональных возможностей для создания объекта-покрытия заложен в использовании построений по ссылкам на объекты этого же или других типов технологической цепочки (таблицы и гриды). Ссылочные объекты могут использоваться как для загрузки в редактируемый слой, так и для использования в виде вспомогательного иллюстративного материала (в виде подложки).

Программный *объект «Грид»* предназначен для обеспечения пользователей средствами компьютерного картопостроения на основе обобщенного подхода сплайновой аппроксимации.

С помощью объектов этого типа могут решаться обычные задачи гридинга по набору фактических данных (как пликативные, так и с разломами), выполняться построение одной или нескольких «вклеек» в существующий грид, производиться расчеты для объектов большой размерности, осуществляться учет анизотропии и другое.

Имеющееся многообразие в средствах решения задач картопостроения обуславливает наличие определенных проблемных моментов при создании соответствующего обеспечения в рамках программного продукта GST (Medium), поскольку основная цель этих программ заключается в предоставлении средств картопостроения пользователям, для которых необязательно детальное владение математической стороной расчетных методов.

Поэтому особое внимание при разработке объекта «Грид» уделено созданию достаточно простого интерфейса для решения специализированных задач. Для установки параметров, использующихся при решении большого круга практических задач, таких как границы области картирования, весовые коэффициенты стабилизаторов, параметры построений с разрывными нарушениями, учета анизотропии и других, достаточно выполнения одной, двух команд «мышкой». Необходимая конфигурация параметров может быть задана в качестве умалчиваемой, и использоваться в дальнейшем без специального определения.

Наряду с этими средствами упрощенной формулировки стандартизованных задач в программах GST (Medium) пользователю предоставляется возможность обобщенной постановки модельных представлений о поведении картируемого параметра в виде одного или нескольких дифференциальных уравнений второго порядка. Конечно, интерфейс при этом усложняется, но остается достаточно логичным и позволяет в полной мере реализовать возможности глобальных и локальных уравнений, сформулированных во второй главе данной работы.

Кроме описанных выше в программе GST реализованы и объекты других типов, предназначенные для решения специальных задач, например, трехмерной визуализации, статистического анализа, макетирования и корреляции и другие.

Формализация технологических объектов и их взаимосвязей, наряду с насыщением их множеством необходимых свойств и инструментов для построения, обеспечивает большой спектр возможностей при создании и использовании описываемых программ. Во-первых, пользователю предоставляется возможность конструирования технологии решения задачи, которая легко архивируется, как связанное дерево элементов с соответствующими атрибутами. Впоследствии эта технология может быть легко восстановлена и для просмотра, и для необходимого редактирования, как ее самой, так и использованных данных. Во-вторых, отработанная технология со всеми параметрами и взаимоотношениями между элементами может «экспортироваться» как некоторый шаблон для решения подобных задач, что позволяет с одной стороны существенно ускорить решение задачи, а, с другой, уменьшить вероятность внесения разного рода ошибок. В-третьих, имеется возможность автоматического перестроения всех необходимых объектов, в случае внесения изменений в какие-либо исходные данные.

В целом, несмотря на ограниченный круг используемых типов объектов, представленное в данной работе интерфейсное обеспечение предоставляет пользователю широкие возможности для определения технологической последовательности и автоматизации решения множества конкретных геологических задач.

В главе 4 приведены примеры, иллюстрирующие широту спектра возможностей использования методов и подходов, изложенных в работе и реализованных в программных комплексах GST (Medium).

В первом примере приводятся результаты, полученные автором в ходе работ по региональной оценке гидроминеральных ресурсов (йодобромных вод) апт-сеноманских отложений Ханты-Мансийского автономного округа. Границы перспективных объектов и, в конечном итоге, величина ресурсов определяются совокупностью параметров, из которых основными являются концентрация полезных компонентов, глубина залегания пласта и фильтрационные свойства коллекторов. Соответственно, в технологию решения задачи входит построение многочисленных взаимосвязанных карт, характеризующих геометрию коллекторов, их фильтрационно-емкостные свойства и закономерности изменения содержания полезных водорастворенных компонентов.

На территории ХМАО апт-сеноманский водоносный комплекс представлен 537 пробам из 282 скважин. При этом содержание йода и брома определено всего в 305 пробах. Недостаточная плотность имеющихся опробований усугубляется проблемами в оценке достоверности полученных данных. В этих условиях картопостроение выступает не только в роли представления пространственных данных, но и в качестве мощного инструмента комплексного анализа качества имеющихся гидрохимических данных.

В первую очередь выполнены построения карты минерализации подземных вод, как обобщающего параметра. В условиях невысокой плотности данных использована дополнительная косвенная информация о пресности подземных вод на границе распространения апт-сеноманских отложений, что обуславливается представлениями об инфильтрационной природе подземных вод в прибортовых участках. Дополнительная информация о литологическом составе вмещающих отложений во внутренних областях рассматриваемой территории (безусловно влияющем на гидрохимический облик) учитывалась в виде геометрии границ распространения свит. По результатам этих построений отбраковывались анализы, резко контрастирующие по сравнению с рядом расположенными данными. Поскольку количество определений йода и брома существенно ниже общего числа данных карты по этим компонентам строились с учетом выполненных построений карт минерализации.

При решении задач оценки эксплуатационных запасов подземных вод апт-сеноманских отложений, как правило, рассматривается трехслойная модель строения коллектора с выделением уватской, ханты-мансийской, викуловской свит и соответствующих им верхней, средней и нижней подсвит покурской свиты. Карты кровли аптских и альбских отложений строилась по данным разбивок и с учетом косвенной

информации по построенным картам кровли и подошвы апт-сеноманских отложений. При построении набора структурных карт и карт общей мощности применена процедура поэтапного построения с подбором необходимых параметров для обеспечения согласованности и приемлемой точности результатов.

При определении и картировании фильтрационно-емкостных свойств отложений также осуществлено построение большого числа карт различных параметров, взаимосвязанных между собой. Например, в построении карт водопроводимости используются карты проницаемости, эффективной мощности, температуры и минерализации. Наличие двух разнородных источников информации – результатов гидродинамических исследований для данных по водопроводимости в целом для апт-сеноманских отложений на водозаборах, прошедших апробацию в ГКЗ РФ, и интерпретации геофизических материалов по проницаемости коллекторов по отдельным свитам определило несколько этапов в технологии построений. На первом построены карты только по материалам интерпретации ГИС. С учетом данных гидродинамических исследований определены поправочные коэффициенты и уточнены значения проницаемости по подсвитам покурской свиты. И затем эти данные использованы при построении карт коэффициента проницаемости и окончательного варианта карт водопроводимости.

Представленные в работе материалы являются примером многоступенчатости технологии решения геологических задач. При этом собственно построение карт не требует использования каких-либо сложных алгоритмов или специализированных модельных представлений. Однако последовательность построений, взаимоотношение табличных данных, карт и гридов весьма сложна. Программный комплекс GST позволяет легко формировать и автоматизировать если не всю описанную выше технологию, то, по крайней мере, ее значительную часть.

Методы математического моделирования рассматриваемых в геологии полей зачастую определяют востребованность использования разнообразных дифференциальных уравнений в частных производных. Для иллюстрации возможностей и достоверности методов работы с уравнениями математической физики, реализованных в GST в рамках решения задач картопостроения, в работе приводятся примеры приближенного решения ряда уравнений, для которых известны точные решения. Интерфейс программы обеспечивает возможность простого ввода коэффициентов уравнений и краевых условий для произвольной ограниченной области. Это позволяет легко выполнять приближенные решения дифференциальных уравнений в частных производных.

Рассмотрены примеры решения различных типов уравнений – эллиптических, параболических и гиперболических, с постоянными и

переменными коэффициентами (уравнения Пуассона, теплопроводности, Клейна-Гордона и Шредингера). Как следует из представленных примеров алгоритмы картопостроения, заложенные в программный комплекс GST, позволяют с высокой точностью (например, погрешность приближенного решения уравнения Пуассона составляет менее одной десятитысячной процента) осуществлять моделирование разнообразных процессов, описываемых с помощью дифференциальных уравнений математической физики и даже восстанавливать определенные параметры этих процессов по наблюдаемым данным.

Заключение. Сложность решения задач автоматизации геоинформационных технологий определяется разнообразием и уникальностью изучаемых геологических объектов; различием в объеме и видах используемых методов исследования параметров, характеризующих эти объекты; накоплением со временем дополнительной информации; недостаточной изученностью взаимосвязей между отдельными параметрами; необходимостью реализации зачастую трудно формализуемых представлений о строении и свойствах изучаемых объектов. В полной мере эти проблемы характерны и для задач, связанных с картопостроением.

Представленный в работе обзор современных методов картопостроения показывает, что ни один из них в полной мере не отвечает современным требованиям практики. Рядом существенных преимуществ, в том числе в использовании косвенной информации, обладает метод обобщенной сплайн-аппроксимации, имеющий значительный потенциал совершенствования.

Выполненное в работе обобщение постановки задачи картопостроения на основе сплайн-аппроксимации, позволило создать эффективные вычислительные алгоритмы, обеспечивающие максимально широкие возможности (в рамках хорошо изученных методов уравнений математической физики) по определению модельных свойств картируемых параметров, их соотношения с известными (определенными ранее) свойствами. Предложенные методы построения карт при большом объеме и существенной неравномерности расположения фактических данных, основанные на композиции разномасштабных гридов, позволяют контролировать и обеспечивать точность результирующего грида в процессе промежуточных вычислений. Разработанный метод моделирования поверхностей с разрывными нарушениями позволяет осуществлять решения задач картирования геологических параметров с единых позиций – в рамках сплайн-аппроксимации на разномасштабных регулярных сетках. Усовершенствованный метод интегрирования функций двух переменных, аппроксимированных бикубическими

сплайнами, обеспечивает эффективность и точность решения задач связанных с оценкой ресурсов.

Предложенный в работе подход по формализации технологических элементов и их взаимосвязей между собой позволил выделить технологию решения задачи в качестве особого составного геоинформационного объекта, структура которого может формироваться пользователем в соответствие с конкретными условиями задачи, архивироваться и храниться в базах данных, восстанавливаться и, при необходимости, модифицироваться. Этим обеспечивается возможность автоматизированной реализации всей последовательности действий при изменении исходных или промежуточных данных.

Разработанные методы реализованы в программном комплексе GST (Medium), который используется для широкого круга разнообразных геологических задач во многих геологических и нефтяных организациях и компаниях Тюменской области, а также других регионов России.

Изложенные в работе материалы свидетельствуют о решении поставленных перед исследованиями задач и обоснованности положений, защищаемых автором.

Полученные результаты и выводы, конечно, нельзя считать исчерпывающими. Исследования должны быть продолжены по многим направлениям. Целесообразно продолжить работы по увеличению функциональных возможностей имеющихся объектов технологической цепочки с целью расширения рамок решаемых геологических задач. Необходимо обеспечить включение в инструментальный арсенал решение задач восстановления трехмерных полей, и, на этой основе, решение двумерных, а в последующем и трехмерных задач геофлюидодинамики, геотермии и моделирования других нестационарных систем. Это, в свою очередь, определяет необходимость разработки новых типов технологических объектов, их функционального и интерфейсного обеспечения.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Нестеров И.И., Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Плавник А.Г. Модель процесса извлечения нефти из глинистых битуминозных пород баженовской свиты Западной Сибири. – Проблемы нефти и газа Тюмени, вып. 44, Тюмень, 1979, с.15-19.
2. Плавник А.Г. Моделирование фильтрационного потока к фонтанирующей скважине.- Труды ЗапСибНИГНИ, вып. 147, Тюмень, 1979, с. 67-74.
3. Курчиков А.Р., Плавник А.Г., Сайтов В.А., Хабаров В.В. Коллекторские и емкостные свойства глин баженовской свиты.- Проблемы нефти и газа Тюмени, вып. 49, Тюмень, 1981, с.12-15.

4. Ставицкий Б.П., Плавник А.Г. Некоторые особенности описания стационарного состояния подземных растворов.- Труды ЗапСибНИГНИ, вып. 164, Тюмень, 1981, с. 3 – 18.
5. Ставицкий Б.П., Плавник А.Г. Определение степени равновесности системы залежь - фон.- Труды ЗапСибНИГНИ, вып. 170, Тюмень, 1981, с. 97 – 98.
6. Ставицкий Б.П., Плавник А.Г. Оценка физико-химического взаимодействия свободных и водорастворенных газов вблизи углеводородных скоплений. В сб. «Молекулярная геохимия нефтегазоносных отложений Западной Сибири», изд. ЗапСибНИГНИ, вып.174, Тюмень, 1982, с. 57-69.
7. Нестеров И.И., Плавник А.Г., Ставицкий Б.П. Масштабы межпластовых перетоков нефти на скважинах месторождения Большой Салым. В сб. «Строение и нефтегазоносность баженинов Западной Сибири». Тюмень, изд. ЗапСибНИГНИ. 1985, с. 164-169.
8. Нестеров И.И., Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Плавник А.Г., Сайтов В.А. Особенности подсчета извлекаемых запасов нефти в залежах баженовского типа. В сб. «Промыслово-геофизические исследования залежей нефти баженовского типа». Тр.ЗапСибНИГНИ, вып.193, Тюмень, 1985, с.4-25.
9. Плавник А.Г., Ставицкий Б.П. Начальное пластовое давление в коллекторе баженовской свиты Салымского месторождения. В сб. «Промыслово-геофизические исследования залежей нефти баженовского типа». Тр.ЗапСибНИГНИ, вып.193, Тюмень, 1985, с.122-133.
10. Плавник А.Г. Моделирование фильтрационного потока в линзовидном коллекторе. В сб. «Математическое моделирование в геологии нефти и газа». Тюмень, изд. ЗапСибНИГНИ, 1986, с 107-112.
11. Плавник А.Г., Силич В.Е. Роль покровных оледенений в формировании пластовых давлений нижнемеловых отложений Западной Сибири. В сб. «Стратиграфия неокома и плейстоцена севера Западной Сибири». Тюмень, изд. ЗапСибНИГНИ, 1986, с 128- 133.
12. Плавник А.Г. Метод моделирования фильтрации в сложных гидродинамических системах. Тезисы VI годичной конференции ВМО. Тюмень, 1987, с.220-221.
13. Плавник А.Г., Гороховцева М.Е., Мальцева М.В. Результаты оценки общей пустотности пород баженовской свиты по данным ГГКп. Тезисы VI годичной конференции ВМО. Тюмень, 1987, с.217-218.
14. Плавник А.Г., Теплякова М.Е. Анализ результатов испытания скважин с учетом двухфазности режима фильтрации. Труды ЗапСибНИГНИ «Совершенствование методов изучения и оптимального освоения подземных флюидных систем», Тюмень, 1991, с.3-15.

15. Сидоров А.Н., Плавник А.Г., Шутов М.С. Геометрическое моделирование залежей нефти и газа с использованием программ GeoФлюид и Medium. Тезисы докладов Всероссийской научной конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна», часть 2, Тюмень, 2000, с.82-84.
16. Сидоров А.Н., Плавник А.Г., Шутов М.С. Особенности моделирования залежей нефти и газа в программах Геофлюид и Medium. // Тезисы докладов пятой научно-практической конференции Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО./ Ханты-Мансийск.-2001.- с.147-148.
17. Плавник А.Г., Сидоров А.Н., Шутов М.С. Задача построения карт с точки зрения конечных элементов. Вестник недропользователя ХМАО. 2003.- № 12.- с.71-76.
18. Сидоров А.Н., Плавник А.Г., Шутов М.С. и др. Комплексы программ моделирования геологических поверхностей и подсчета запасов – GeoFluid, Medium, GST. Пути реализации нефтегазового потенциала ХМАО. Шестая научно-практическая конференция. Ханты-Мансийск, 2003, т. 2, с. 257-258.
19. Сидоров А.Н., Плавник А.Г. Решение дифференциальных уравнений в частных производных методами сплайн-аппроксимации. Труды Международной конференции по вычислительной математике МКВМ-2004 / Под ред. Г.А. Михайлова, В.П. Ильина, Ю.М. Лаевского. – Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2004, ч. 2, с. 648-652.
20. Сидоров А.Н., Плавник А.Г., Шутов М.С., Степанов А.В., Сидоров А.А., Пономарева М.А. Особенности программного обеспечения для подсчета запасов УВ GST и GeoFluid. // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты- Мансийского автономного округа. Том 2 (Седьмая научно-практическая конференция). Под ред. Карасева В.И., Ахпателова Э.А., Волкова В.А. – Ханты-Мансийск. – 2004. с. 272 – 279.
21. Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Конторович А.Э. Плавник А.Г. Гидрохимическая зональность юрских и меловых отложений Западно-Сибирского бассейна. Геология и геофизика, Геология и геофизика, 2004, т. 45, № 7, с. 826-832.
22. Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Плавник А.Г. Гидрохимическая зональность подземных вод ХМАО. // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты- Мансийского автономного округа. Том 3 (Седьмая научно-практическая конференция). Под ред. Карасева В.И., Ахпателова Э.А., Волкова В.А. – Ханты-Мансийск. – 2004. с. 213 – 225.