

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИИ

1. К истории развития геоинформационных систем в природопользовании

В настоящее время практически ни одна задача природопользования не решается без использования той или иной геоинформационной технологии.

Разработка геоинформационных технологий связана с развитием программного обеспечения для обработки и интерпретации геолого-геофизических данных. Реализация программного обеспечения шла по пути создания отдельных программ (1960-1970 гг.), систем программ (1970-1980 гг.) и автоматизированных систем обработки геоданных (конец 70-х – начало 80-х годов прошлого столетия). Существенный прогресс в развитии программного обеспечения связан с появлением географических информационных систем (начало 90-х годов XX века) [4].

Географические системы – компьютерные технологии, работающие с координатно-привязанными объектами и описывающими их атрибутами, в отличие от автоматизированных систем, для которых по координатной географической привязке исходных данных и результатов их обработки, как правило, отсутствует.

При этом важно подчеркнуть именно координатную привязку объектов (и описывающих их атрибутов) различной сложности (точечные, линейные, площадные, поверхности) в географических системах, а также возможность реализации топологических покрытий при построении карт, отсутствующие в автоматизированных системах. Топологические покрытия представляют наложение друг на друга нескольких различающихся по содержанию тематики картографических объектов: населенные пункты, скважины – точечные объекты, речная сеть, тектонические нарушения – линейные объекты, литологические разности пород, выходы интрузий – площадные объекты, рельеф местности, изолинии содержания химических элементов и значений физических полей – поверхности.

Основой создания географических систем послужили, с одной стороны, картографические системы, направленные на построение карт различного назначения: географических, топографических, геологических, планов городов, лесных массивов, земельных угодий и т.д., с другой стороны, информационно-поисковые системы, обеспечивающие быстрый поиск требуемой записи, массива, файла по их символам.

В свою очередь географические информационные системы Arc Info и Arc View, как наиболее распространенные в России, не предназначенные изначально для решения задач

природопользования: геокартирование, прогноз и поиски месторождений полезных ископаемых, изучение глубинного строения земной коры, геоэкология, мониторинг природных систем, – определили развитие геоинформационных технологий на базе синтеза автоматизированных систем обработки данных (АСОД) и географических систем (ГИС).

АСОД до сих пор играют важную роль при решении задач природопользования. Любая высокоорганизованная АСОД состоит из базы данных (БД), системы управления базой данных (СУБД) и пакета прикладных программ (ППП), определяющего содержательную функцию системы. Различают методно-ориентированные АСОД с задачами обработки и интерпретации данных конкретного геофизического (или геохимического) метода и проблемно-ориентированные АСОД с задачами комплексного анализа геолого-геофизических данных для решения конкретных задач природопользования.

Многоуровневый (космос – воздух – земля – скважина) и комплексный (различные виды геофизических, геохимических исследований) характер геолого-геофизических данных определил необходимость развития принципиально новых геоинформационных систем, ГИС-технологий, ориентированных на интегрирование исходных данных и результатов их обработки и интерпретации для различных методов, съемки по которым проведены на разных уровнях наблюдений. Подобной системой, обеспечивающей решение широкого спектра задач природопользования, в настоящее время в России является система ГИС ИНТЕГРО, созданная в лаборатории геоинформатики ВНИИгеосистем [7, 8, 13, 15], и аналогов которой за рубежом пока не существует.

Прежде чем перейти к описанию интегрированной геоинформационной системы ГИС ИНТЕГРО, рассмотрим возможности наиболее распространенных геоинформационных технологий, применяемых при решении различных задач природопользования.

2. Геоинформационные технологии комплексного анализа, материалов дистанционного зондирования

Комплексный анализ материалов дистанционного зондирования (МДЗ), получаемых при космо- и аэросъемках, впервые был реализован на базе географических информационных систем с задачами составления земельных кадастров, классификации лесных и сельскохозяйственных угодий и т.д. Современные технологии комплексного анализа МДЗ представлены универсальными и специальными системами. Универсальные системы Arc Info и Arc View являются коммерческими и обеспечивают решение задач как

по землепользованию, так и по недропользованию и экологии. Специальные системы привязаны к решению узкого круга задач.

Одной из таких систем, ориентированной на работу с изображениями при космо- и аэросъемках является RDAS Imagine с версиями как для персональных компьютеров, так и для рабочих станций. Стандартный базовый комплект этой системы предусматривает: гистограммные преобразования и сравнения, цветовые построения мозаик из нескольких изображений, фильтрацию изображений в скользящих окнах, средства классификации изображений с обучением на эталонных объектах и без обучения (метод главных компонент). Конкурирующей системой является ER Mapper с дополнительным пакетом обработки радарных данных и использованием большого числа алгоритмов (свыше 200) обработки и комплексного анализа изображений.

Технология ENVI работает с цифровыми данными космо- и аэросъемок, а также с геологическими и геофизическими данными, обеспечивая путем классификационных алгоритмов с обучением и без обучения оконтуривание областей для прогноза рудных районов и рудных полей.

Помимо отмеченных технологий, достаточно распространенной в мире системой является Auto-CAD MAP фирмы Autodesk, используемой в качестве базового для картографии.

Отечественными технологиями, реализующими комплексный анализ данных космо- и аэросъемок, совместно с данными наземных геологических, геохимических, геофизических методов являются ГИС-ПАРК [2] и ГИС ИНТЕГРО [8, 13, 15]. Обе системы были разработаны в середине-конце 90-х годов в соответствии с концепцией создания Государственной геологической карты России масштабов 1:1000000 (Госгеолкарта-1000) и 1:200000 (Госгеолкарта-200), являются векторно-растровыми с сочетанием функций картографической, информационно-справочной, аналитической и прогнозирующих систем. Их использование обеспечивает пространственный многомерный и комплексный анализ разноуровневой информации. Однако применение ГИС-ПАРК, созданной под операционную систему MS DOS, к настоящему времени существенно ограничено.

3. Технологии обработки и комплексного анализа геоданных с целью геокартирования, прогноза и поисков полезных ископаемых

Для решения задач геокартирования, прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых создано большое количество автоматизированных систем, среди которых выделяются методно-ориентированные для обработки данных отдельных геофизических

методов, и проблемно-ориентированные для комплексного анализа геоданных с целью прогноза и поисков различных видов минерального сырья.

К методно-ориентированным АСОД относятся системы СЕЙСПАК («Иркутскгеология») и СЦС-3 (Центральная геофизическая экспедиция) для стандартной обработки и интерпретации данных сейсморазведки с целью поисков и прогноза месторождений углеводородов. На смену СЦС-3, удостоенной в 1988 г. Госпремии СССР, пришла новая версия СЦС-5, удовлетворяющая в настоящее время до 30% отечественного рынка услуг в сейсморазведке. Основными производителями программного обеспечения в сейсморазведке в последние годы являются зарубежные компании: Halliburton (США) с системой ProMAX, Paradigm Geophysical Ltd (Израиль-Россия) с системой Focus, CGG (Франция) с системами Integral Plus и Geovector.

Для обработки данных гравиразведки и магниторазведки используются системы ГРАВИПАК (Иркутскгеология) и REIST-ROMGAS (Аэрогеофизика).

К наиболее развитым, в смысле использования современного математического аппарата, технологиям комплексного анализа геоданных являются автоматизированные системы РЕГИОН (Международный научно-исследовательский институт проблем управления), КОСКАД-3Д (МГРИ-РГГРУ), ПАНГЕЯ (ЗАО «ПАНГЕЯ»), система ТЕСТ (институт геологии СО РАН), КОМПАК (Иркутскгеология), система РЕГИОН, реализующая байесовский подход при прогнозе и поисках месторождений редких и радиоактивных элементов, в 1989 г. отмечена Госпремией СССР. Технология КОСКАД-3Д [12] содержит широкий спектр приемов распознавания с обучением и классификации без обучения. Ее отличительными особенностями являются реализация адаптивных процедур разложения геофизических полей на составляющие, выделения слабых аномальных эффектов, вычисления статистических, спектральных и градиентных характеристик (атрибутов) геополей в скользящих окнах «живой» формы.

КОСКАД-3Д используется для прогноза и поисков месторождений углеводородов и рудных полезных ископаемых по комплексу атрибутов.

Технология ПАНГЕЯ получила применение при прогнозе и поисках углеводородов, обеспечила широкий рынок в Китае.

Задачи геокартирования, структурно-тектонического районирования, прогноза и поисков месторождений твердых полезных ископаемых успешно решаются на базе ГИС-ПАРК и ГИС-ИНТЕГРО. Последняя включает в себя технологию КОСКАД-3Д и, помимо прогнозно-поисковых задач, используется в геоэкологии, для мониторинга природных систем.

Система ТЕСТ, построенная на базе методов математической логики, и технология КОМПАК, реализующая методы факторного анализа, получили распространение в Восточной Сибири при прогнозе и поисках рудных и нефтегазовых месторождений.

4. Технологии комплексной интерпретации данных сейсморазведки и геофизических исследований скважин

Данные сейсморазведки с использованием кинематических и динамических атрибутов, рассчитываемых в скользящих окнах временного разреза, являются комплексными, а данные геофизических исследований скважин (ДГИС) уже по своей природе – комплексные. Создаваемые технологии комплексной интерпретации данных сейсморазведки и каротажа с учетом анализа керна решают задачи литологического расчленения разрезов скважин и корреляции литологических разновидностей пород в межскважинном пространстве, определения вещественного состава горных пород, построения геологических и гидродинамических моделей залежей углеводородов.

Впервые разработка технологии комплексной интерпретации ДГИС была осуществлена еще в 1962 г. на базе АСОД «Кора-3» (институт прикладной математики РАН). Современные технологии комплексного анализа данных сейсморазведки и каротажа реализованы фирмой Schlumberger и ее дочерними предприятиями. Их возможности проанализированы в работе [5]. В России используются такие технологии, как CHARISMA, Geo Frame, INTEGRAL, TIGRESS, PETROSYS, LANDMARK. Отечественной разработкой при проведении обработки и комплексной интерпретации большинства геолого-геофизических данных по скважинам и данных сейсморазведки на единой информационной базе является система ГЕММА (Центральная геофизическая экспедиция). Система ГЕММА решает задачи площадной обработки и комплексного анализа ДГИС (подсистема ГИС), анализов результатов исследования керна (подсистема КЕРН), интерпретации данных сейсморазведки (подсистема СЕЙС), вертикального сейсмического профилирования (подсистема ВСП), гидродинамических исследований скважин (подсистема ГДИ), построения геологической модели (подсистема МОДЕЛЬ). База данных системы содержит каротажную, геологическую, собственно промысловую, керновую, сейсмическую информацию. Ее СУБД-SYBASE обеспечивает оперирование большими объемами разнородной информации, работу в сети многих клиентов и функционирование на компьютерах разных платформ. Сервер SYBASE, БД и управляющее ядро системы расположены на RISC-компьютерах. Комплексная интерпретация данных геофизических исследований скважин и сейсморазведки реализуется в подсистеме ИНПРЕСС. Построение геологических моделей среды и

месторождений при их объемной визуализации и с учетом изменения геологического времени осуществляется с помощью программных средств динамической визуализации (DV), в частности, DV Seisgeo. Введение дополнительной координаты – оси геологического времени важно при проведении мониторинговых исследований и изучения изменения геологических структур в течение различных геологических эпох [6].

К достаточно развитым технологиям комплексной интерпретации данных сейсморазведки и каротажа относятся ПАРМ-КОЛЛЕКТОР (ВНИИгеофизика), отмеченная Госпремией СССР, ИНТЕГРАН (ВНИИгеосистем). Среди компьютерных технологий комплексной интерпретации ДГИС следует отметить автоматизированные рабочие места (АРМ) типа САПФИР (совместная разработка ВНИГНИ, ВНИГИКа и ВНИИгеосистем), предназначенного для построения фильтрационно-емкостной модели коллектора. Другой тип АРМа-ГИС-Подсчет (ВНИИгеосистем, УкрНИГРИ) и АРМ-ГИС ГИНТЕЛ (Тверьгеофизика) формируют литологическую модель геосреды с выделением коллекторов и оценкой их фильтрационно-емкостных свойств, обеспечивающих определение подсчетных параметров нефтегазовых залежей.

5. Технологии количественной комплексной интерпретации данных наземных геофизических методов

Количественная комплексная интерпретация геофизических данных, в отличие от комплексного анализа, требует реализации достаточно сложных алгоритмов решения прямых и обратных задач геофизики. Ее результатом является построение физико-геологических моделей среды и исследуемых объектов. Большинство технологий комплексной интерпретации ориентировано, в основном, на построение моделей по данным двух наземных методов.

При этом геометрия модели, т.е. форма и глубина залегания контактных поверхностей (фундамента, выдержанных преломляющих и отражающих границ) обеспечивается результатами интерпретации данных сейсморазведки, а затем, путем подбора на основе решения прямых задач гравиразведки, электроразведки, отчасти и магниторазведки, осуществляется определение физических параметров среды между контактными поверхностями.

Среди технологий количественной комплексной интерпретации данных сейсморазведки и гравиразведки отметим:

- GCIS (Ухтинский технический университет и Ивано-Франковский нефтяной институт) для решения прогнозно-поисковых задач нефтегазовых залежей, в которой путем интерактивного подбора модели среды осуществляется построение согласованной сейсмоплотностной модели геологического разреза;
- программные комплексы института геофизики национальной Академии наук Украины, с целью построения согласованных сейсмо-плотностных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии.

Технология комплексной интерпретации данных сейсморазведки и электроразведки по методу зондирования становлением поля создана в НВ НИИГГ и ЗАО ГЕОНЕФТЕГАЗ. Эта технология реализует построение согласованных сейсмоэлектрических временных разрезов (СЭВР) при решении прогнозно-поисковых задач нефтегазовых залежей. В основе технологии заложена зависимость между t_0 временных сейсмических разрезов и временем становления электромагнитного поля $t_{3СБ}$.

Технология комплексной интерпретации гравимагнитных данных REIST-ROMGAS (Аэрогеофизика) реализует построение согласованных по плотности и магнитной восприимчивости 2D- и 3D-моделей геосреды. На первом этапе осуществляется оценка формы и глубины залегания контактных поверхностей путем Эйлеровской деконволюции, корреляционного зондирования потенциальных полей, а также по изменению градиента логарифма спектров полей. Далее 3D-модели представляются набором призм бесконечной протяженности, размеры которых увеличиваются с глубиной (идея палетки Гамбурцева). Для каждой призмы подбираются значения плотности и магнитной восприимчивости таким образом, чтобы достичь совпадения рассчитываемых от модели полей с наблюдаемыми значениями при заданной погрешности их отклонений от модельных данных.

Технология REIST-ROMGAS широко используется для построения обновленных карт фундамента Русской платформы [1].

Основой технологии комплексной интерпретации гравимагнитных данных Mult Alt являются статистические алгоритмы распознавания образов [3]. Отличительная особенность этой технологии состоит в автоматизированном способе построения моделей геобъектов по комплексу потенциальных и отчасти геохимических полей, сочетающем алгоритмы оценивания искомым параметров объектов и распознавания образов. На первом этапе комплексной интерпретации строятся модели распределения физических свойств по отдельным физическим полям, а на втором этапе осуществляется комплексирование таких распределений с использованием алгоритмов распознавания

образов. При этом априори назначается набор искомых альтернативных объектов и задаются эталонные площади распределения физических свойств и геометрических параметров каждого объекта, а при их отсутствии – диапазоны изменения физических свойств и параметров, характерные для каждого из искомых альтернативных объектов. Указанные эталонные области и диапазоны возможных изменений значений физических свойств и геометрических параметров используются для построения решающих правил при распознавании образов. Технология Mult Alt опробована при решении задач рудной геологии.

6. Геоинформационная система ИНТЕГРО

Геоинформационная система ИНТЕГРО (ГИС-ИНТЕГРО) решает широкий спектр задач природопользования, включающий: автоматизированное построение геологических карт различного содержания и назначения; автоматизированное построение легенд для серии листов миллионного и двухсоттысячного масштабов; структурно-тектоническое районирование исследуемых территорий, построение геологических разрезов в рамках Федеральной программы МПР РФ Госгеолкарта-200, компьютерный прогноз твердых полезных ископаемых, построение согласованных по физическим свойствам и геометрии физико-геологических моделей среды при изучении глубинного строения земной коры; геоэкологическое районирование.

Указанные задачи решаются на основе интегрирования разноуровневых и разнометодных по координатно привязанным пространственным геолого-геофизическим данным.

Возможность построения количественных физико-геологических моделей, согласованных по физическим свойствам, геометрии и форме изучаемых объектов на основе комплекса геолого-геофизических данных, зарегистрированных на разных уровнях исследований определяет преимущества ГИС ИНТЕГРО как перед географическими системами общего назначения (Arc View, Arc Info), так и перед геоинформационными технологиями комплексной интерпретации геофизических данных, ориентированных на решение узкого класса задач с использованием, как правило, лишь двух геофизических методов.

6.1. Состав и структура ГИС ИНТЕГРО

В основу построения ГИС ИНТЕГРО положены принципиальные требования:

- 1) использование в качестве входной информации растровых и векторных изображений карт, материалов дистанционного зондирования Земли (космо- и

- аэросъемки), результатов наблюдений геофизических полей и фактографических данных различного типа, привязанных к пространственным объектам;
- 2) совместная обработка различных (пространственных, атрибутивных и прочих) исходных материалов вне зависимости от применяемой технологии ввода и совместимости по форматам данных с ведущими географическими системами;
 - 3) интегрирование пространственных и фактографических данных в одной геоинформационной оболочке, использование прямых и обратных связей между системами управления пространственными и непространственными данными;
 - 4) совмещение и интеграция данных, полученных различными способами, их преобразование в картографические проекции, как отечественные, так и международные, при условии открытости системы и пополнения её новыми проекциями;
 - 5) интерфейс между геоинформацией, хранящейся в разных формах и форматах, обеспечивающий широкий набор преобразований и трансформаций данных в соответствии с конкретной задачей природопользования.

В ГИС ИНТЕГРО предпочтение отдано трехчастной схеме построения (см. рис. 1): СУБД (сервер данных), модуль представления и управления информацией (геоинформационная оболочка) и прикладные модули (блок редактирования данных, информационно-справочный и аналитический блоки). Такая схема позволяет четко разделить функции хранения и обеспечения целостности исходных данных, преобразования и выполнения запросов и расчетов данных, а также интерактивного интерфейса с пользователем.

Многообразие прикладных задач природопользования на основе широкого комплекса геолого-геофизических данных обеспечивает построение легко расширяемой системы, разные блоки которой могут существовать и компоноваться друг без друга, могут создаваться разными коллективами, но опираясь на единую информационную базу. ГИС ИНТЕГРО включает прикладные блоки (рис. 1) по генерализации геологических карт перевод информации из векторной в сеточную и обратно; редакция и трансформация сеточных данных (редактор ТОС-таблицы «объекты-свойства»); обработку и интерпретацию геолого-геофизической информации, прогноз полезных ископаемых и т.д.

Сервер данных системы реализует ввод данных с внешних носителей и проверку их корректности, обеспечивает общение с векторной и атрибутивной картографической информацией (неравномерные сети, наборы объектов), с сеточной (равномерные 2D и 3D

сети) и растровой (изображения, космо- и аэрофотоснимки) информацией, а также с дополнительной (метаданные – данные о данных, гипертексты) информацией. Сервер содержит драйверы для разных форматов данных, блоки проверки их корректности.

Геоинформационная оболочка системы – общий интерфейс пользователя и одновременно управляющий модуль. Оболочка реализует функции ввода разной информации (векторной, растровой, сеточной) через сервер; интерактивного разбиения векторных объектов на иерархические тематические группы; визуализации информации; конструирования стилей, соответствующих тематическим группам, интерактивного управления визуализацией и управления информацией (удаление, перенос, модификация).

В состав геоинформационной оболочки входят: программа просмотра с визуализацией любого типа информации; конструктор стилей и конструктор тематических (топологических) групп, а также ГИС-конструктор – генератор картографических проекций с созданием конкретных информационных справочных систем, т.е. ГИС-конструктор реализует построение сцен на базе растровой, векторной и сеточной информации. Далее на его основе организуется проект, задающий правила перехода от сцены к сцене. Проект может быть построен из набора картографических баз данных, что позволяет организовывать иерархию этих баз и тем самым эффективно использовать разномасштабную картографическую информацию. Подобная иерархия обеспечивает высокую скорость доступа к информации и оптимизацию использования ресурсов памяти.

Основные функциональные блоки ГИС ИНТЕГРО, построенные для решения различных задач природопользования, рассматриваются ниже.

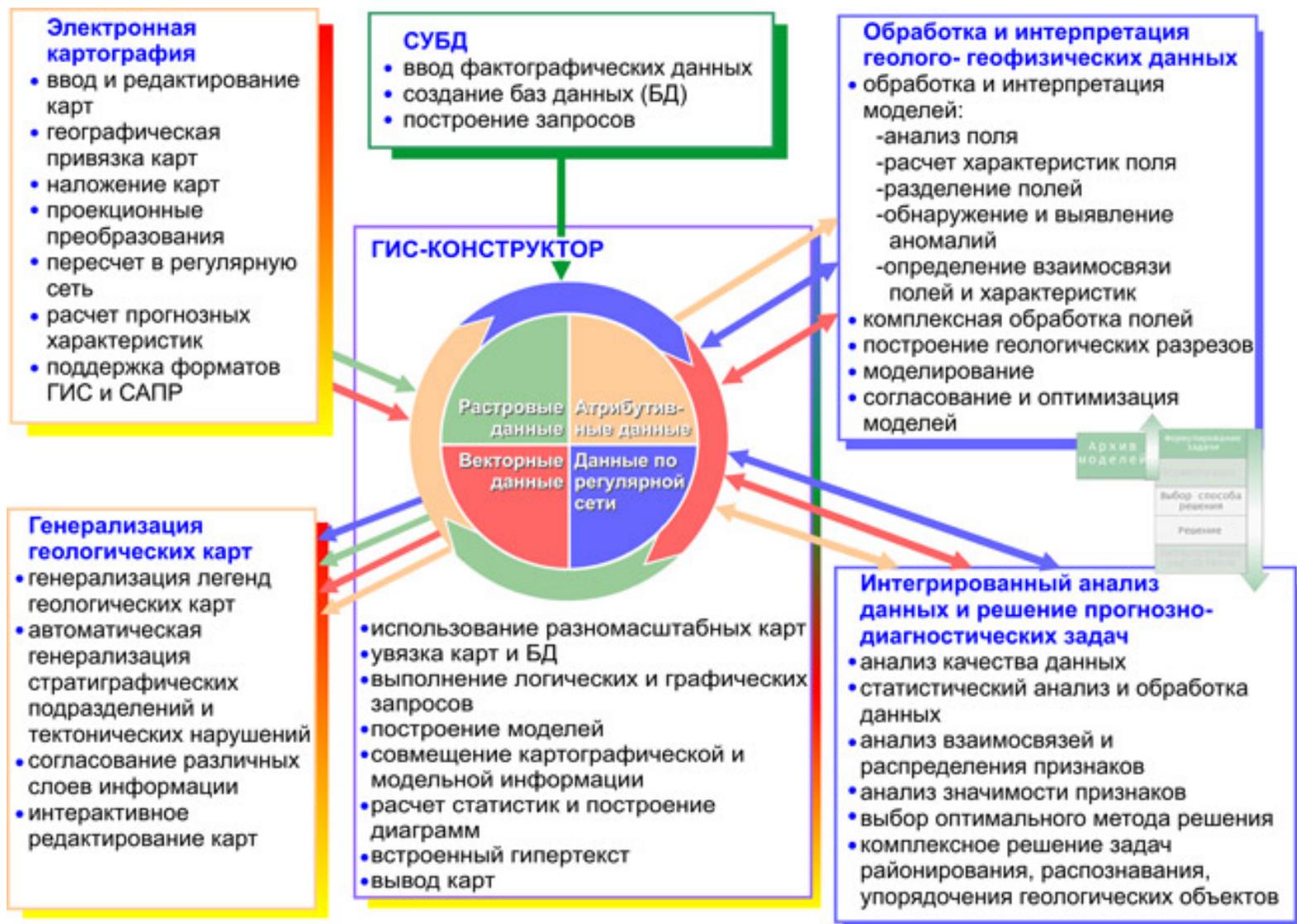


Рис. 1. Структурно-функциональная схема ГИС ИНТЕГРО

6.2. Создание цифровых моделей геологических карт

Создание цифровых моделей геологических карт – основа большинства ГИС-технологий, включая ГИС ИНТЕГРО. Отличительной особенностью ГИС ИНТЕГРО является возможность генерализации мелкомасштабных карт по крупномасштабным данным и картам. При этом геологические материалы, созданные в форматах системы Arc Info конвертируются в ГИС ИНТЕГРО. В ГИС ИНТЕГРО в одном слое (топологическом покрытии) совмещаются все объекты карты, образованные линейными объектами (тектонические нарушения, границы литологических разностей пород, и т.д.), в другом слое – все площадные объекты и т.д. В отдельных слоях хранится дополнительная информация о разграфке сводного листа с целью его картографической привязки, а также сведения об элементах залегания горных пород, фауне и т.д. Подобная структура снижает затраты на этапе первичной редакции листа карты, поскольку все полигонообразующие объекты находятся в одном покрытии (слое). Присвоение атрибутов объектам обеспечивается индификатором в базе легенд.

В ГИС ИНТЕГРО эффективно реализована технология составления комплекта Госгеолкарты-1000 путем генерализации материалов Госгеолкарты-200 для всех видов регионального геологического изучения территории.

Генерализация линейных элементов на карте включает:

- объединение разломов, которое состоит в соединении в единый разлом группы продолжающих друг друга однонаправленных разломов, либо в квазипрямолинейные, либо в кольцевые структуры;
- разбраковку разломов по соотношению с геологическими границами, т.е. выделяются разломы, не имеющие с геологическими границами общих точек, а также разломы, пересекающие границы;
- генерализацию разломной тектоники по основным направлениям, которую начинают с разлома максимальной длины. При этом, близко расположенные к последнему, разломы того же направления либо присоединяют к разлому максимальной длины, либо их удаляют при короткой длине, либо заменяют на один между двумя близко расположенными и параллельными разломами.

Генерализация геологических границ включает: удаление общих границ, удаление внемасштабных объектов, разрежение геологических границ (удаление границ, не различимых в результирующем масштабе), сглаживание геологических границ (загрубление рисовки границ и исключение деталей, несоизмеримых с масштабом создаваемой карты); притягивание геологической границы к линейным элементам путем проверки всех вершин на близость к линейному элементу.

Созданная в соответствии с серийной легендой геологическая основа масштаба 1:200000 сбивается по рамкам листов, уточняется с помощью материалов дистанционного зондирования, поверяется на кондиционность, редактируется и принимается за основу макета Госгеолкарты-1000, т.е. масштаба 1:1000000. Построение геологических карт сопровождается в ГИС ИНТЕГРО автоматизированным построением геологических разрезов. В основу построения разрезов принята модель подобной складчатости. Построенные по данным геологической карты разрезы корректируются с учетом буровых и геофизических данных. Пример создания цифровой модели геолкарты и построения геологического разреза приведен на рис. 2.

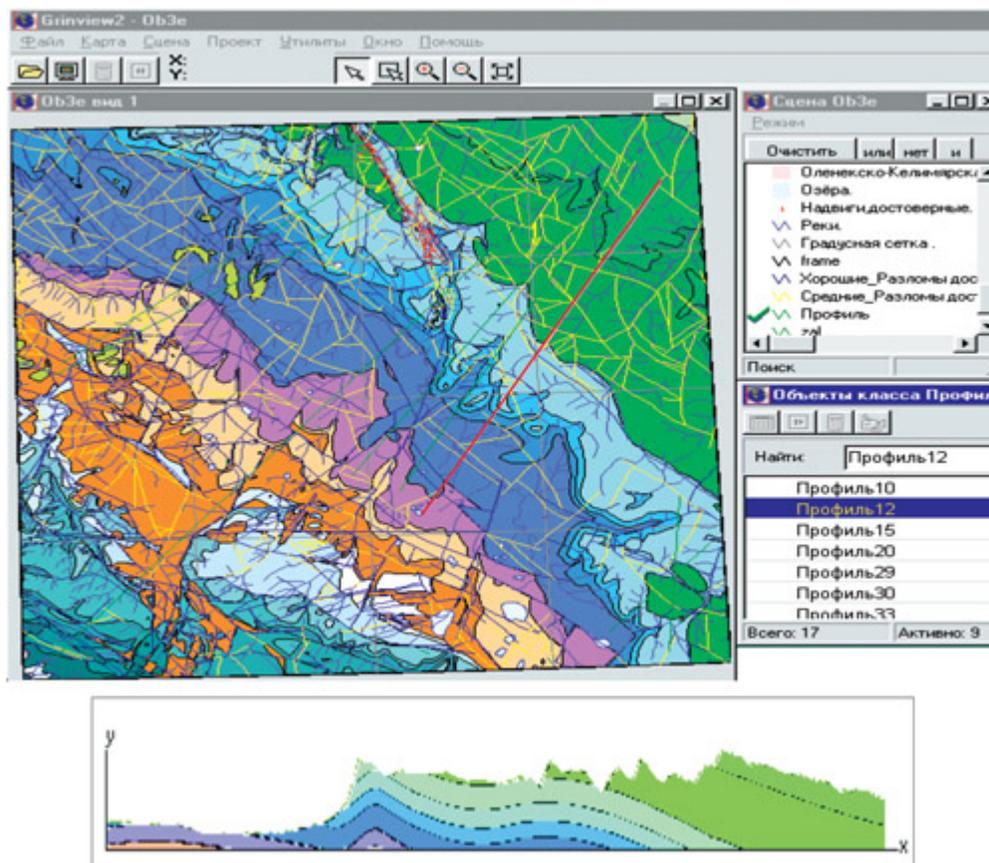


Рис. 2. Геологическая карта и геологический разрез

6.3. Технология геологического районирования территорий

Геологическое, структурно-тектоническое, металлогеническое районирование в системе ГИС ИНТЕГРО базируется на системном анализе разноуровневой и разнометодной геоинформации.

Цель районирования состоит в создании модели современного геологического строения земной коры с выделением площадей со специфическими чертами развитых в их пределах ассоциацией горных пород (структурно-вещественных комплексов) и

тектонических структур. Районирование осуществляется по комплексу признаков (атрибутов) и отражает особенности геотектонического положения отдельных площадей, их геолого-исторического развития и минерагенической специализации. Районирование включает широкое использование дистанционных и наземных геофизических методов, на базе первых отмечается проявленность тех или иных структурно-вещественных комплексов и геологических структур, их взаимоотношений и распространения на поверхности Земли, а на основе наземных геофизических методов получают характеристики изучаемых объектов, как на поверхности, так и по глубине. Технология ГИС ИНТЕГРО при районировании включает:

- сбор и анализ информации о строении территории;
- предварительную обработку изображений МДЗ;
- специализированную цифровую обработку изображений и геополей;
- визуальное дешифрирование;
- построение морфоструктурной схемы.

Исходными данными при районировании являются топографическая основа заданного масштаба, схемы тектонического и геоморфологического районирования разных масштабов, обзорные карты ландшафтов, растительности, почв. По топографической основе строится цифровая модель рельефа в виде регулярной сети или треугольной нерегулярной сети с использованием Arc Info. По этой модели осуществляется выделение крупных структур рельефа и градиентов для районирования по уровню уклонов поверхности и локализация областей с резкими перепадами высот, что обеспечивает построение схемы морфоструктурного районирования.

Обработка изображений МДЗ состоит в установлении и анализе выраженности объектов картографирования в различных спектральных диапазонах. Специализированная цифровая обработка изображений предусматривает выделение образов искомым объектов на основе анализа характеристик фототона и закономерностей его рисунка. При этом осуществляются: низкочастотная фильтрация для выделения крупных структурных элементов, высокочастотная фильтрация для подчеркивания мелких структурно-вещественных комплексов и линеаментов; классификация изображений для выделения участков с одинаковым поведением фототона. Зная характеристики фототона конкретного природного объекта, используется классификация по эталонам.

Структурно-морфологическая схема определяет блоковое строение территории с ранжировкой выделенных структур и их геологической интерпретацией. Районирование по геофизическим данным включает: разделение полей по их характеру (по спектрально-

корреляционным свойствам); выделение линейных элементов; ранжирование выделенных по спектрально-корреляционным свойствам блоков и линеаментов.

6.4. Технология ГИС ИНТЕГРО при прогнозе месторождений полезных ископаемых

Общая схема постановки и решения прогнозно-поисковых задач на основе ГИС ИНТЕГРО приведены на рис. 3.

В отличие от АСОД, ориентированных на решение прогнозных задач по комплексу геолого-геофизических данных, технология ГИС ИНТЕГРО базируется на системном подходе и включает оригинальные по своему содержанию блоки:

- формулирование задачи с указанием цели, априорных представлений о геолого-прогнозной модели объекта; в частности генетического его типа. Сам объект прогноза или поиска выбирается в соответствии с целью и масштабом исследований. Формальными задачами прогноза по комплексу геологических, геофизических, геохимических полей являются: выделение объектов для поисковых работ (районирование); разделение объектов на перспективные и неперспективные по степени их сходства с эталонными объектами (разбраковка территории); упорядочение (ранжировка) перспективных объектов по их значимости (оценка). Информация в виде растровых данных МДЗ, векторной картографической информации, числовых геофизических и геохимических полей (сеточные данные) приводится к единому объекту исследований, в качестве которого является прямоугольная площадка, с размерами, соответствующими минимальному размеру объекта прогноза.
- формализацию модели, состоящую в определении соответствия геолого-прогнозной модели исходным данным, описании критериев и атрибутов для решения задачи. При этом технология использует три типа формальных моделей: *критериальную*, задаваемую группой критериев, наличие которых благоприятствует достижению на данном объекте максимума целевой функции (под целевой функцией понимаются ожидаемые запасы или ресурсы), *аналоговую*, построенную на принципе аналогий и обеспеченную достаточным числом эталонных объектов с различными значениями целевой функции; *критериально-аналоговую*, сочетающую в себе наличие критериев и принципа аналогий.

- анализ данных и выбор метода решения задачи сводятся к оценке качества исходных данных и выбору алгоритма решения на основе методов таксономии (алгоритм голотип), распознавания образов с использованием байесовского подхода. При отсутствии эталонных объектов решается задача районирования на базе методов главных компонент или К-средних.

В технологии предусмотрены различные ситуации, возникающие в практике геолого-геофизических исследований: имеются эталоны разных классов и они представительны; имеются эталоны разных классов и они неrepresentative; имеются эталоны только продуктивного класса; эталоны отсутствуют.

Интерпретация результатов решения по прогнозу осуществляется геологом путем согласования этих результатов с целью исследований.



Рис. 3. Схема постановки и решения геолого-прогнозных задач на основе ГИС ИНТЕГРО

6.5. Построение согласованных физико-геологических моделей земной коры в системе ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА

Технология построения согласованных физико-геологических моделей земной коры на базе ГИС ИНТЕГРО реализована в соответствии с созданием Государственной сети опорных геофизических профилей [9]. Обычно модели земной коры строятся по данным одного или двух геофизических методов. Развитие системы ГИС ИНТЕГРО с включением в нее современных технологий по интерпретации данных сейсморазведки, электроразведки, гравиразведки и магниторазведки позволило обеспечить создание комплексных физико-геологических моделей земной коры непосредственно по данным всех основных методов геофизики. Такое развитие системы ГИС ИНТЕГРО получило название в виде технологии ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА. В состав интерпретационного блока этой технологии, помимо самой ГИС ИНТЕГРО, вошли: технология ИНТЕГРАН – программно-методический комплекс обработки и интерпретации данных сейсморазведки, система ROMGAS – комплекс обработки и совместной интерпретации данных грави- и магниторазведки; обрабатывающий комплекс данных магнито-теллурического зондирования ЗАЩ «Северо-Запад»; технология КОСКАД-3Д, а также оригинальное программно-алгоритмическое обеспечение по согласованию результатов интерпретации монометодных геофизических данных, созданное В.И. Галуевым, С.А. Капланом, С.С. Малининой, Н.Н. Пимановой во ВНИИгеосистем.

Бесспорным достижением системы ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА является технология согласования монометодных моделей земной коры. Эта технология осуществляется путем проецирования данных разных методов на единый профиль и пространственного согласования моделей, полученных по результатам интерпретации монометодных данных, как по площади, так и по глубине.

На основе пространственно увязанных монометодных моделей реализуется параметризация комплексной модели путем уточнения положения границ блоков и контактных поверхностей и установления функциональных связей физических свойств различных методных моделей.

Согласование моделей, обеспечивающее количественную комплексную интерпретацию геофизических данных, предусматривает выбор параметров, сходных по своей физической сущности и размерности. При этом детальность исследований должна быть соизмеримой по всем геофизическим методам, а в параметрах интерпретации должны проявляться одни и те же геологические объекты. В качестве таких параметров используются: интервальные скорости, плотности, сопротивления; дифференциально-

нормированные характеристики, представленные производными по глубине от логарифмов физических свойств.

Дифференциально-нормированным преобразованием (ДНП) в сейсморазведке является коэффициент отражения $\frac{d}{dz}[\ln(V\sigma)]$, где V – скорость, σ – плотность; в

гравиразведке – вертикальная производная от логарифма плотности $\frac{d}{dz}(\ln\sigma)$; в

электроразведке – вертикальная производная от логарифма сопротивления ρ : $\frac{d}{dz}(\ln\rho)$.

Экстремумы дифференциально-нормированных параметров приурочены к границам резкой смены сейсмической жесткости, плотности, сопротивления, что и позволяет перейти к согласованию монометодных границ между собой и построению комплексной физико-геологической модели земной коры. Поскольку глубинность магниторазведки в основном определяется глубиной залегания кристаллического фундамента, то проводится согласование гравимагнитных моделей отдельно для верхней части земной коры. Для сопоставления интервальных скоростей и сопротивлений кривые МТЗ осредняются и по участкам профиля на основе согласования кривых по их форме. Далее для осредненных кривых решается обратная задача и строится геоэлектрический разрез. На основе полученных зависимостей интегральной проводимости от глубины и выделенных по сейсмическим данным границ рассчитываются интервальные сопротивления. Согласованные по данным сейсморазведки и электроразведки интервалы, как вдоль профиля, так и по глубине пространственно отражают размеры объектов земной коры. Обычно отмечается рост сопротивления и скорости от поверхности кристаллического фундамента до глубин 10-20 км, при дальнейшем увеличении глубины рост скорости сохраняется, а сопротивление начинает убывать из-за увеличения температуры. В отдельных пространственных интервалах общая закономерность изменения скорости и сопротивления нарушается. Геологической причиной корреляции уменьшения и скорости и сопротивления одновременно являются ослабленные участки земной коры – сейсмические волноводы.

Уменьшение сопротивления при увеличении скорости связывается с действием мощных проводящих отложений в осадочном чехле. Пример построения согласованной физико-геологической модели земной коры по геотраверсу 1-СБ с использованием технологии ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА приведен на рис. 4.

В результате обработки данных геофизических методов получены ДНП – преобразования по плотности, намагниченности и сопротивлению, по которым определялись границы основных контактных поверхностей (рис. 4 а, б, в).

На следующем этапе геометризации земной коры на фрагменте профиля проводилось построение крупноблочной модели путем совмещения сейсмоэнергетического разреза и глубинных субгоризонтальных, субвертикальных и наклонных границ, трассируемых по результатам ДНП-преобразования эффективной плотности и намагниченности (рис. 4 з).

Обобщая положение наиболее выдержанных границ в пространстве характеристик, используемых для геометризации модели среды, представляется возможным, в качестве наиболее контрастных и протяженных выделить следующие.

На профиле 1-СБ, наиболее рельефно, прослеживаются границы земной коры, связанные с областями расслоенности на глубинах соответственно: 20-30 и 50-55 км. Границы, связанные с осадочным чехлом и фундаментом, выражены менее отчетливо, за исключением западной части профиля, где им соответствует область повышенной энергетики на глубинах порядка 5 – 10 км и характеризуются воздыманием на восток. Раздел Мохоровичича установлен в окрестности глубин 55 км. В западной части профиля он имеет регулярный по энергетике характер и залегает субгоризонтально. В восточной же части профиля окрестность раздела Мохоровичича отличается пониженной сейсмоэнергетикой и возможным подъемом рельефа поверхности Мохоровичича до уровня 48-50 км.

По комплексу признаков разрез может быть разделен на 4 блока (рис. 4 з). Первый из них, западный, характеризуется наличием трех уровней расслоенности земной коры: десятикилометровым, связанным с осадками и фундаментом, следующий связан с уровнем 20 км, отличается плавным поведением области повышенной сейсмоэнергетики и субгоризонтальным характером раздела Мохоровичича, представлен уникальным по глубине повышением значений энергии сейсмических сигналов отраженных волн. Обращает на себя внимание наличие клиноформного характера узких областей увеличения значений сейсмоэнергетической характеристики земной коры между последними двумя уровнями преимущественно в интервале глубин 3-50 км. Причем подъем рельефа клиноформ имеет место в восточной части блока. В верхней части коры, в интервале 10-20 км имеет место сейсмически прозрачная зона. Восточный край первого блока ограничен субвертикальной зоной шириной 20-30 км, отличается пониженной сейсмоэнергетикой в окрестностях Мохоровичича (разрыв МОХО), уменьшением сейсмоэнергетики на среднем уровне.

Второй блок от 220 до 440 км, приурочен в Енисейскому кряжу, характеризуется отсутствием значимой сейсмической энергии на уровне осадочного чехла, несколько повышающейся в восточной половине блока. Энергетически выраженные области

приурочены к глубинам 20-25 км и 50-55 км. Характерной чертой блока является заметная сейсмическая контрастность в пределах всей нижней коры, за исключением узкой зоны относительной прозрачности на глубинах порядка 50 км. В целом, восточная половина блока, по относительному снижению энергетики нижних разделов коры и наличию узких субвертикальных, сейсмически мало контрастных зон, отличается от западной части.

Третий блок от 450-460 км до 660 км отличается широкой зоной повышенной сейсмической контрастности, возможной расслоенности коры в диапазоне глубин 20-50 км. В целом, зона имеет выпуклый характер, с наиболее приподнятой частью в середине блока. Здесь же имеет место субвертикальная полоса уменьшения сейсмической контрастности пониженной энергетики и слабая энергетическая проявленность границы Мохоровичича (Юрубчано-Тахомская зона). В представленном варианте сейсмоэнергетического разреза осадочный чехол не выделяется повышенными значениями энергии, хотя на представленном варианте разреза для осадочного чехла (рис. 4 б) отражающие границы для отложений осадочного чехла выделяются достаточно уверенно.

Самый восточный блок, характеризуется относительным повышением сейсмической контрастности (энергетики) с многочисленными субвертикальными слабоконтрастными узкими зонами слабоконтрастными, по всей вероятности пронизывающие всю кору. Осадочный чехол энергетически не выражен, хотя отдельные участки границ прослеживаются уверенно.

Объединение результатов монометодной геометризации в виде обобщенной физической модели земной коры на рассматриваемом профиле схематически представлено совокупностью блоков и средних значений физических характеристик в их пределах (рис. 4 з).

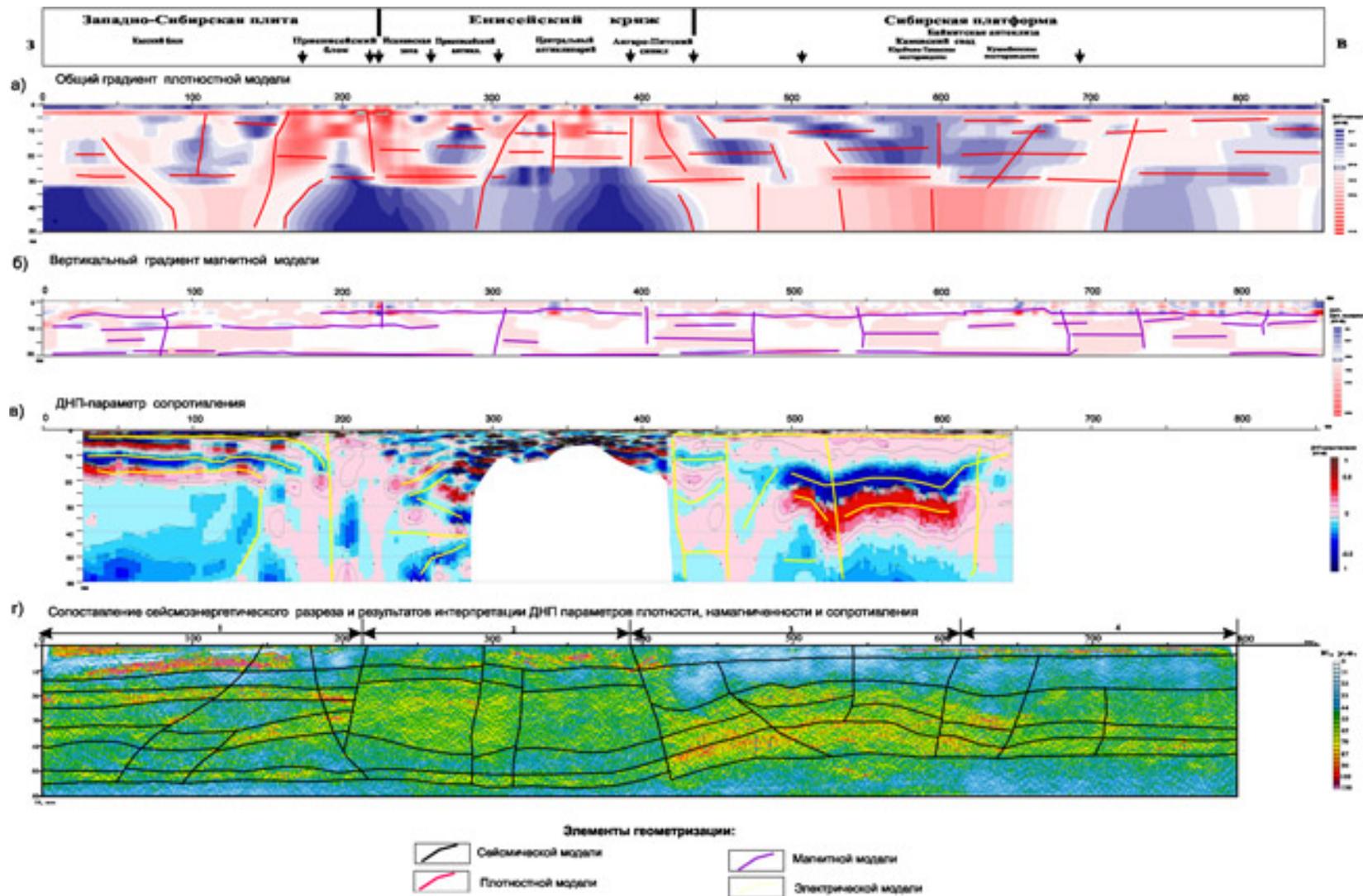


Рис. 4. Интерпретация ДНП-параметров отдельных геофизических характеристик и их сопоставление по профилю 1-СБ

6.6. Технология комплексной оценки геоэкологического состояния территории

Отличительной чертой комплексной оценки геоэкологического состояния территории на базе ГИС ИНТЕГРО является эффективное технологическое решение, обеспечивающее автоматизированное формирование экологической составляющей модели развития исследуемой территории. А также компьютерный анализ пространственного проявления входящих в нее факторов на основе алгоритмов многокритериального районирования [10]. Предлагаемая технология включает: формулирование модели, ее формализацию и расчет модели. При этом в зависимости от анализа экологической ситуации на разных уровнях управления природопользования все содержательные задачи экологической оценки сведены к трем типам формальных постановок:

- оценка сложности геоэкологических условий: участки с благоприятными, условно благоприятными и неблагоприятными условиями для освоения месторождений;
- оценка последствий воздействия на геологическую среду, сводящаяся к районированию территории на участки с разным состоянием экосистем и их способности к сомовосстановлению;
- оценка риска загрязнения при аварийной ситуации, осуществляемая при контроле за уже эксплуатируемыми объектами недропользования.

Для каждой из указанных выше формальных постановок выработаны факторы, т.е. состав модели для различных этапов геоэкологической оценки территории [10].

Формализация и наполнение модели реализуются путем перехода от качественного описания факторов модели к расчету пространственных характеристик их проявления на изучаемой территории. Для согласования разнородных источников информации эти характеристики рассчитываются в формате регулярной сети с выбором размера ячейки, определяемого площадью минимально значимого объекта на исходных картографических слоях.

Заключительным этапом технологии является расчет модели, включающий районирование территории на основе обработки комплекса формальных признаков с помощью классификационных алгоритмов. Данная технология опробовалась в различных экологических проектах по оценке геоэкологического состояния ряда российских и зарубежных территорий. В качестве примера ниже приводятся результаты оценки состояния природной экосистемы, выделение основных возмущающих факторов и прогноз возможных последствий их воздействия по Ханты-Мансийскому автономному

округу, для которого характерен весь спектр современных экологических проблем нефтегазового комплекса.

Целью районирования явилась оценка благоприятности геоэкологических условий для освоения месторождений. В модель вошли три группы факторов:

- общие климатические (влажность, температура воздуха), геоэкологические (температура и режим промерзания грунтов), ландшафтные (состав и виды почв) и геоморфологические: по уязвимости ландшафтов и потенциалу их самоочищения;
- плотность объектов техногенного воздействия (дорожная сеть, трубопроводы, населенные пункты) и существующий уровень нарушенности ландшафта (степень его деградации), определяющие интенсивность нагрузки на природную среду;
- природоохранные ограничения (заповедники, водоохранные зоны и т.д.), частичный или полный запрет на проведение разработки месторождений.
- Результаты районирования по первой группе факторов приведены на рис. 5 а, на котором выделены ландшафты четырех типов: крайне уязвимые, уязвимые, малоуязвимые и условно неуязвимые. Районирование по второй группе факторов (рис. 5 б) ранжирует территорию с разным уровнем нагрузки на природную среду. Наконец, третья группа факторов позволила выделить области частичного и полного запрета на разработку недр (рис. 5 в).

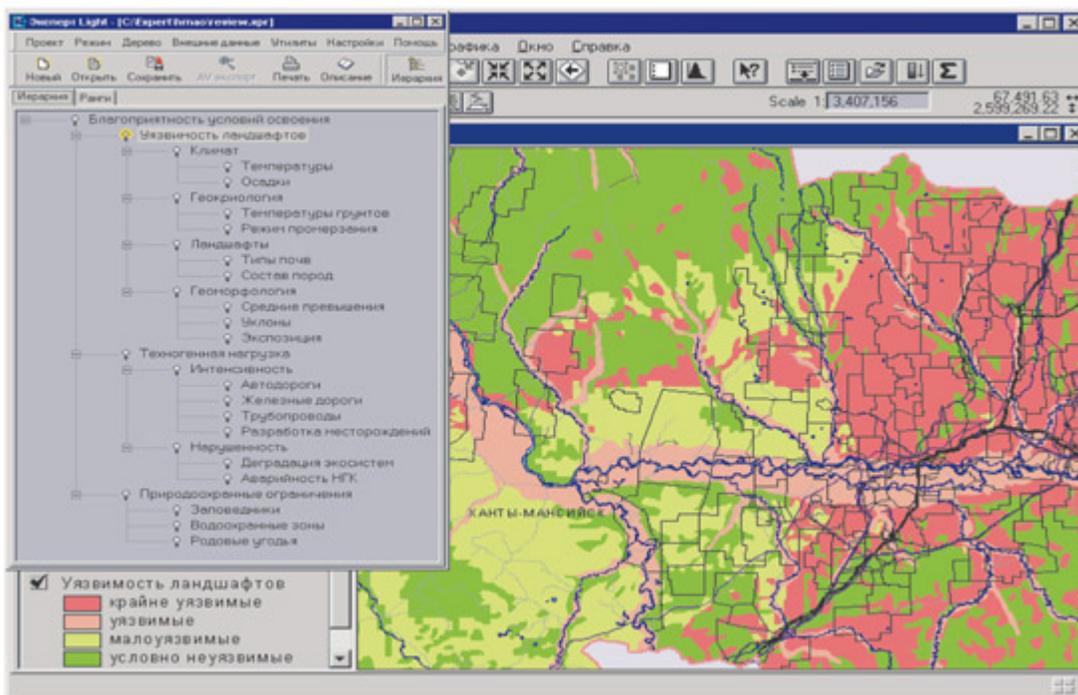


Рис. 5а. Оценка уязвимости ландшафта

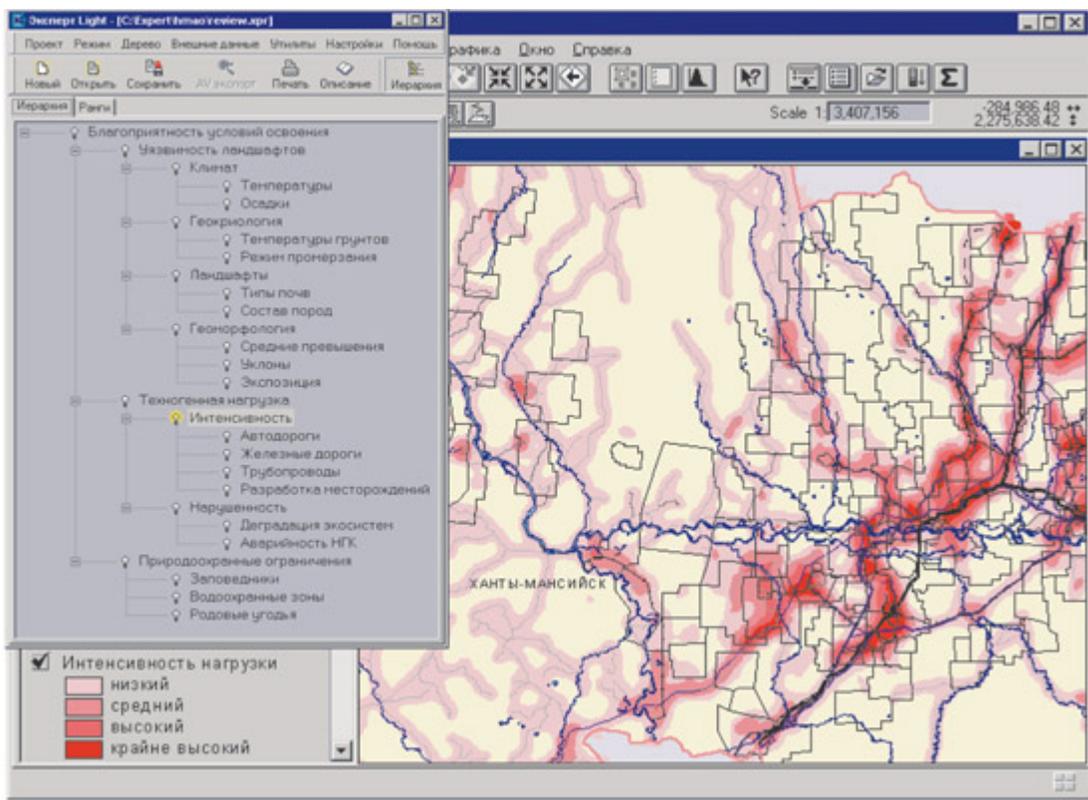


Рис. 5б. Оценка интенсивности техногенного воздействия

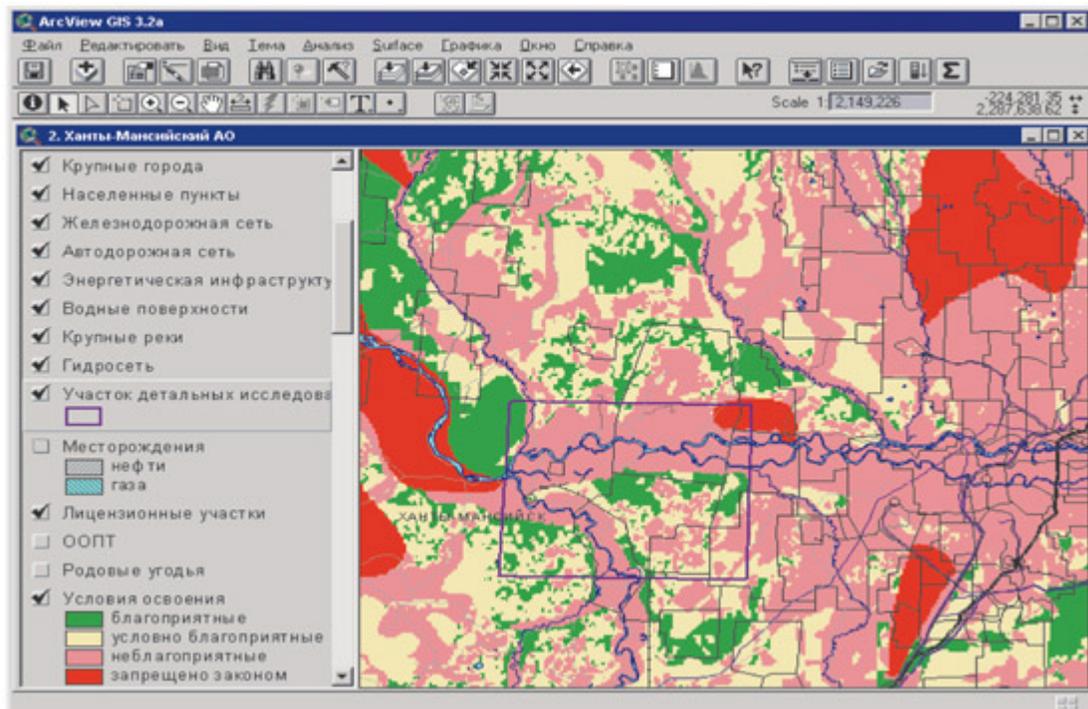


Рис. 5в. Оценка благоприятности условий освоения территории округа

7. Выводы

1. В настоящее время для решения задач природопользования используется достаточно широкий спектр геоинформационных технологий. Среди этих технологий особое место занимает система ГИС ИНТЕГРО, обеспечивающая решение как традиционных задач по геокартированию и прогнозу месторождений полезных ископаемых, так и задач по изучению глубинного строения земной коры, геоэкологии и мониторингу природных систем. При этом, в отличие от других компьютерных технологий, ГИС ИНТЕГРО является интегрированной системой в смысле обработки и интерпретации разноуровневой и разнометодной информации.
2. В последние годы на базе ГИС ИНТЕГРО разработан новый тип геоинформационных технологий – информационно-аналитических систем для обеспечения рационального природопользования и устойчивого развития регионов [11]; для поддержки принятия управленческих решений в природопользовании создан ситуационный центр МПР России, основой которого явилась единая информационная среда по интеграции различных информационных ресурсов (недра, леса, воды) при решении задач природопользования.
3. Компьютерная технология количественной комплексной интерпретации по построению согласованных физико-геологических моделей земной коры ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА не имеет аналогов в мировой практике. Для широкой реализации в практике научных и производственных организаций ГИС ИНТЕГРО и ГИС ИНТЕГРО ГЕОФИЗИКА необходимы реклама в периодических отечественных и зарубежных журналах, регулярное участие на международных конференциях.
4. Дальнейшее развитие геоинформационных технологий при решении задач природопользования следует связывать:
 - с переводом существующих программных комплексов на новую среду разработки VISUAL STUDIO NET, базирующуюся на библиотеке классов Frame Work;
 - с расширением спектра решаемых геологических задач, в частности, в области инженерно-геологических изысканий;
 - с использованием сетевых возможностей, в частности, ИНТЕРНЕТ, для оперативного взаимодействия исполнителей и заказчиков.

Литература

1. Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А. Изучение рельефа кристаллического основания платформенных областей по данным магниторазведки и гравиразведки. Геофизика, 2003, № 6, с. 55-58.
2. Геоинформационная система ПАРК, версия 6.01. Введение в систему и технологию, 2000, ЛАНЕКО, 98 с.
3. Гольцман Ф.М., Калинин Д.Ф., Калинина Т.Б. Компьютерная технология Mult Alt альтернативной классификации и прогноза по комплексу геоданных. Российский геофизический журнал, 2000, № 17-18. с. 64-70.
4. Де Мерс М.Н. Географические информационные системы. Основы. М. Изд. Дата+, 1999, 490 с.
5. Зенкин С.В., Неретин В.Д. Современное состояние программных комплексов геолого-гидродинамического моделирования месторождений нефти и газа. Каротажник, Тверь, 2002. Вып. 92. Изд. АИС. С. 35-61.
6. Кашик А.С., Кириллов С.А., Ческис В.Л. Решение геологических задач в четырехмерном многопараметровом пространстве. Геофизика. Специальный выпуск «Технологии сейсморазведки-II». Изд. ГЕРС, Тверь, 2003, с. 3-16.
7. Кузнецов О.Л., Черемисина Е.Н. Геоинформатика, геоинформация, геоинформационные технологии в природопользовании. Геоинформатика, 2003., № 2, с. 3-10.
8. Кузнецов О.Л., Никитин А.А., Черемисина Е.Н. Геоинформационные системы. Информационный центр ВНИИгеосистем., 2005, 345 с.
9. Липилин А.В. Система обработки и интерпретации геофизических данных при создании Государственной сети опорных геофизических профилей. Геофизика, 2002, № 3. С. 27-31.
10. Любимова А.В. Компьютерная технология комплексной оценки геоэкологического состояния территории. Геоинформатика, 2003, № 2, с. 44-47.
11. Митракова О.В. Создание информационно-аналитических систем для обеспечения рационального природопользования и устойчивого развития регионов. Геоинформатика, 2003, № 2. С. 15-18.
12. Петров А.В., Трусов А.А. Компьютерная технология статистического и спектрально-корреляционного анализа трехмерной геоинформации. Геофизика, 2000, № 4. С. 29-33.
13. Создание государственных геологических карт на базе ГИС ИНТЕГРО. М. ВНИИгеосистем, 2001. 208 с.

14. Чесалов Л.Е. Единая информационная среда для интеграции информационных ресурсов при решении задач природопользования. Геоинформатика, 2003, № 2. С. 11-14.
15. Финкельштейн М.Я., Деев К.В. Развитие инструментальных средств ГИС ИНТЕГРО. Геоинформатика, 2003, № 2. С. 49-51.