

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР И ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

А.Н. Петров, И.Н. Горячев, С.М. Лямин

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан

Обсуждаются проблемы построения и анализа геометрических моделей геологических структур. Описывается подход к созданию геометрических моделей в виде семейств поверхностей и его частная реализация – метод построения и анализа линий простирания. Приводятся результаты применения программ, реализующих этот метод, для изучения ряда геологических объектов Северо-Востока России. Обращается внимание на необходимость включать в геоинформационные системы первичные данные, к которым относятся замеры элементов залегания.

Ключевые слова: ГИС-технологии, элементы залегания, геометрические модели, геологические структуры.

ВВЕДЕНИЕ

Несколькими поколениями геологов накоплен огромный фактический материал, требующий обобщения и осмысления. Новые информационные технологии делают этот материал общедоступным, а наличие высокопроизводительной, доступной каждому исследователю и простой в обращении вычислительной техники позволяет подвергать его быстрой и эффективной обработке. Одним из важных видов геологической деятельности становится создание электронных банков и баз данных. Эта сложная и трудоемкая работа должна принести и уже приносит свои плоды. Эффективное использование вычислительной техники для обработки информации предполагает разработку соответствующего программного обеспечения. Широкие перспективы в этом направлении открывают геоинформационные технологии, обеспечивающие сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение данных, имеющих географическую привязку [1, 2]. Применение ГИС-технологий в геологических исследованиях открывает новые возможности. Но, оценивая эти возможности, необходимо обратить внимание на ряд особенностей.

Географическая информационная система геологического содержания чаще всего рассматривается как электронный аналог геологической карты, т.е. как пространственно-временная модель строения и истории развития объекта исследований. В то же

время, геологическая карта, особенно крупномасштабная, является источником фактического материала, отображающая такие элементы, как места находок окаменелостей, элементы залегания слоистости, сланцеватости, линейности и др. На обычных бумажных носителях объем отображаемого первичного фактического материала ограничен возможностями чертежных инструментов и типографской техники. В этом отношении электронные варианты карт предоставляют гораздо больше возможностей, позволяя хранить большие объемы информации, и отображать только то, что необходимо при решении конкретной задачи. В идеале информационные системы должны содержать весь фактический материал, полученный в процессе полевых исследований и первичной камеральной обработки. Но чаще приходится иметь дело с ГИС, созданными либо путем оцифровки ранее созданных геологических карт, либо методами, эмулирующими ручную рисовку, ориентированную в большей степени на воображение и интуицию, нежели на строгие правила. Работа с информационными системами такого рода сводится не к анализу самих фактов, приводящих к выводам о строении и развитии изучаемой территории, а к выявлению следствий, вытекающих из представлений авторов карты.

Практическая работа с ГИС сводится к обработке данных программами либо входящими в состав самой информационной системы, либо имеющими прямой доступ к ее данным. Любая компьютерная программа сводит решение задачи к выполнению

простейших математических операций по четко заданному алгоритму. Составить алгоритм можно только в том случае, когда разработана математическая модель изучаемого объекта. Математическая модель, как, впрочем, и любая другая, базируется на предположениях и упрощениях, которые накладывают ограничения на использование программы. В этом отношении одной из главных проблем современной геологии является разработка и применение способов математического моделирования в геологических исследованиях. Геолог, использующий компьютерные программы в исследовательских целях, должен понимать суть математического метода, применяемого для решения конкретной задачи, его реальные возможности и содержательный смысл получаемых результатов, не перекладывая всю ответственность на разработчиков программного обеспечения.

Необходимо учитывать и то обстоятельство, что большинство математических методов, применяемых в геологии, разработано до середины прошлого века, когда о возможностях современной техники нельзя было и мечтать. Разработка новых методов исследований, ориентированных на использование компьютерных технологий, представляет собой вид деятельности, объединяющий геологию, математику и программирование. Работа в этом направлении ведется в СВКНИИ ДВО РАН с 1991 г. За это время разработано несколько методов компьютерного моделирования [11–13, 15], применимых для решения задач структурной геологии. На их основе созданы программы, использованные при изучении ряда геологических объектов [3, 6–9]. Эта деятельность может рассматриваться и как одно из направлений геоинформатики, и как составная часть геологии. В любом случае, это направление исследований тесно соприкасается и с геологией, и с информатикой.

ПОСТРОЕНИЕ И АНАЛИЗ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

Основная задача структурной геологии – создание и анализ моделей, отражающих формы и взаимное расположение геологических тел – так или иначе, связана со всеми видами геологической деятельности. Эта же задача является одной из главных при создании и использовании ГИС геологического содержания. Методы структурной геологии в явном или неявном виде опираются на геометрию – раздел математики, изучающий формы и положения как таковые. С этой точки зрения основной целью структурной геологии является создание и анализ геометрических моделей геологических тел. Аппарат геометрии предоставляет большие возможности для решения широчайшего спектра задач во всех сферах

деятельности человека. Специально для целей компьютерного моделирования разработано направление – вычислительная геометрия [5, 16, 17], методы которой воплощены во многих графических программах. Дополнительные возможности предоставляют способы компьютерной визуализации, позволяющие отображать результаты вычислительных процедур в наглядном и выразительном виде. Естественно, что эти методы могут и должны применяться и в геологических исследованиях, но, разумеется, с учетом их специфики.

Самая распространенная задача вычислительной геометрии состоит в нахождении поверхности, проходящей через множество опорных точек, отвечающей дополнительным условиям. Очевидным способом создания геометрических моделей геологических структур является представление геологических границ в виде поверхностей в трехмерном евклидовом пространстве, а выходы границ на поверхность – в виде линий. Это позволяет представлять исходные данные о морфологии каждой геологической границы в виде множества точек и использовать для компьютерного моделирования приемы и методы вычислительной геометрии, в том числе и реализованные в некоторых популярных программах (например Surfer фирмы Golden Software). Однако такой подход возможен только при наличии весьма представительного фактического материала, которым мы чаще всего не располагаем. Кроме того, простые и достаточно эффективные методы, основанные на аппроксимации явной функцией, не пригодны для моделирования границ с вертикальными и опрокинутыми залеганиями, т.е. в тех случаях, когда поверхности целесообразно аппроксимировать неявными или параметрическими функциями. Нахождение таких функций представляет собой задачу более сложную, требующую нетривиальных решений.

Количество данных, необходимых для построения каждой границы, можно сократить, используя вычислительных процедурах элементы залегания. Последние определяют ориентировку плоскости, которая либо совпадает с границей, либо является для нее в данной точке касательной. Элементы залегания целесообразно использовать при аппроксимации линий и поверхностей сплайнами. В алгоритмах, которые широко используются в системах автоматического проектирования, направления касательных обычно фигурируют как вспомогательные величины, которые необходимо вычислять. При моделировании геологических объектов направления касательных, определяемые по элементам залегания, могут выступать в качестве исходных данных [14]. При построении

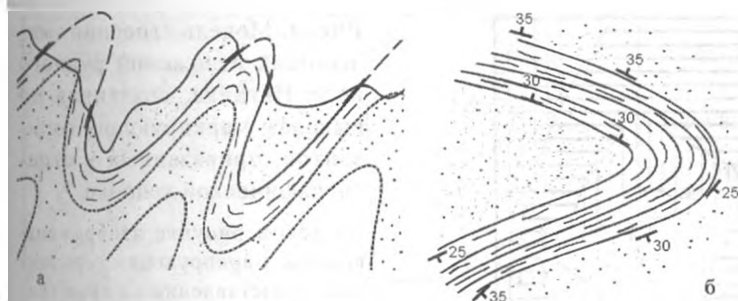


Рис. 1. Отображение геологических границ кубическими сплайнами по элементам залегания в различных ситуациях на разрезе (а) и на плане (б).

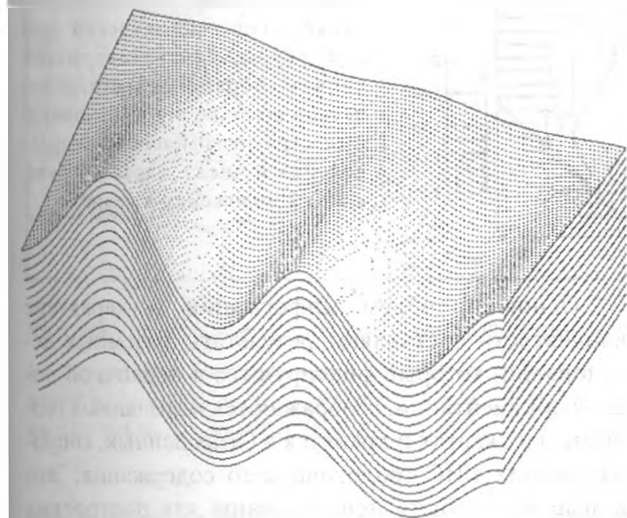


Рис. 2. Моделирование складчатой структуры в виде семейства поверхностей. (Результат численного эксперимента).

нии разрезов направления касательных будут определяться углами падения, а при построении линий на плане – направлениями простираций (рис. 1).

Для изучения пликативных структур нами предлагается геометрическая модель, в которой связано дислоцированное слоистое тело представляется в виде семейства непересекающихся поверхностей, каждая из которых обладает теми же свойствами, что и стратиграфическая граница. Образно говоря, слоистое тело представляется в виде множества поверхностей, плотно заполняющих пространство, подобно тому, как листы тонкой бумаги образуют пачку (рис. 2).

Каждая такая поверхность обладает теми же свойствами что и стратиграфическая граница – относительно нее все тело разбивается на две части, верхнюю и нижнюю. Поверхности являются упорядоченными: они образуют последовательность, которая остается неизменной при любых деформациях. Каждой поверхности можно приписать действительное число, которое отражает стратиграфическое положение границы (чем больше число, тем бо-

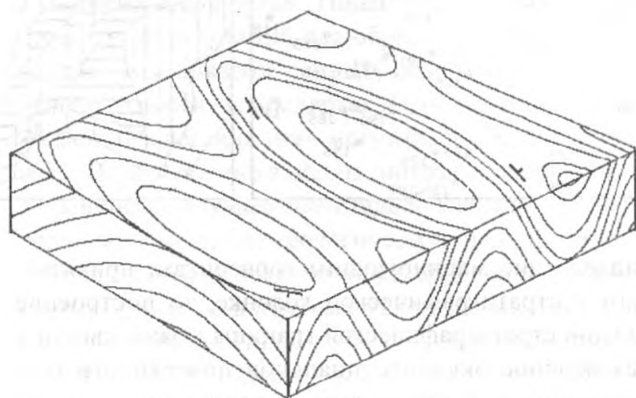


Рис. 3. Сечения слоистого тела горизонтальной и вертикальными плоскостями. (Результат численного эксперимента).

лее высокое положение занимает соответствующая граница). Данная модель основывается на свойствах стратиграфических отношений, присущих именно геологическим объектам. С ее помощью выделяются не только явные границы между слоями, но и множество границ неявных, выявляемых по косвенным признакам. При этом все поверхности являются взаимозависимыми, и данные по каждой из них служат построению модели всего тела. Сечения семейства поверхностей плоскостями представляет собой множество линий, отображающих характер складчатости: на горизонтальной плоскости границы представляются линиями, касательные которых совпадают с направлениями простираций, а на вертикальной плоскости (разрезе) касательные соответствуют видимым углам падения (рис. 3).

В качестве аналитического описания семейства поверхностей можно использовать непрерывную полевую функцию, определяющую в каждой точке пространства стратиграфический параметр – число, индивидуализирующее положение в разрезе. Если в качестве исходных данных использовать точки, при-

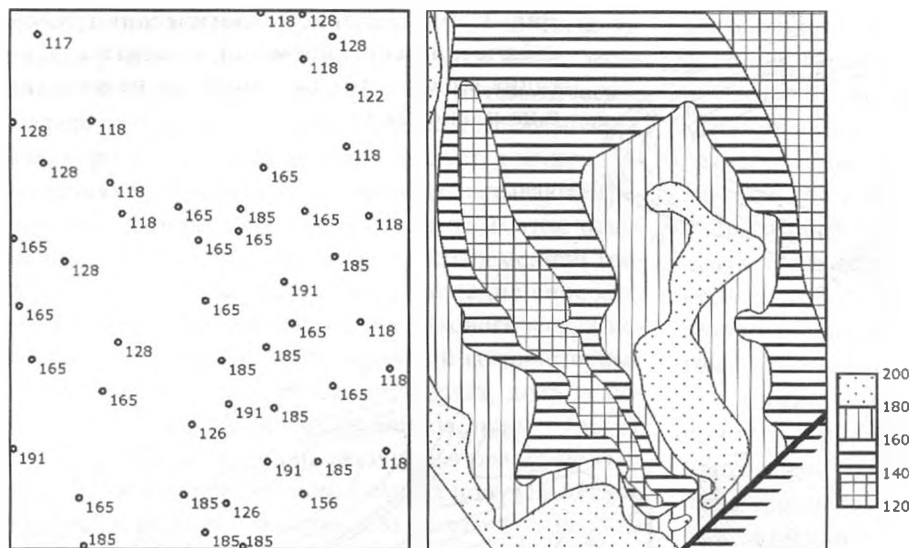


Рис. 4. Модель строения вмещающих отложений рудного поля Наталка, созданная по выходам маркирующих горизонтов, привязанных к стратиграфической колонке.

На левом рисунке изображены выходы маркирующих горизонтов, представленные в виде скалярных величин. На правом рисунке – гипсометрический срединный разрез структуры, соответствующий уровню моря. На стратиграфической колонке показаны основные стратиграфические подразделения и числа, характеризующие их положения в разрезе.

надлежащие маркирующим горизонтам, привязанным к стратиграфической колонке, то построение каждой стратиграфической границы можно свести к нахождению эквипотенциальной поверхности скалярного поля. Такая постановка задачи уместна в тех случаях, когда на изучаемой территории детально описана стратиграфия, и при этом в разрезе присутствует достаточно много отчетливо различимых маркирующих горизонтов. По этому принципу была создана упрощенная геометрическая модель структуры Наталкинского рудного поля [11, 12] (рис. 4).

Чаше приходится иметь дело с ситуацией, когда значительную часть территории составляют мощные отложения без явно выраженных горизонтов. В таком случае замеры элементов залегания можно произвести во многих точках, но соотнести их с конкретными геологическими границами не удастся. Определенные выводы о морфологии складок могут быть получены на основе количественно-статистической оценки с помощью стереографических сеток. Такая оценка дает возможность установить и общие закономерности в строении исследуемых комплексов [4]. Нами предлагается другой подход, суть которого состоит в том, что семейство поверхностей описывается кусочно-непрерывной векторной функцией, определяющей в каждой точке ориентировку нормали проходящей через нее поверхности, или, другими словами, направления градиентов скалярного поля. Если такая функция определена, то с ее помощью могут быть построены искомые поверхности. В этом случае исходными данными служат координаты точек и измеренные в них элементы залегания слоистости. Алгоритм решения такой задачи для трехмерного моделирования складчатых структур в общих чертах нами разработан, но практического применения пока не получил.

Основной объем информации о характере складчатости составляют результаты наземных исследований, которые фиксируются в первичной полевой документации, отображаются на изданных геологических картах и хранятся в базах данных, сопровождающих ГИС геологического содержания. Эти данные могут быть использованы для построения линий простирания. Такие структурные линии иногда изображаются на специализированных геологических картах для повышения их наглядности и выразительности. Иногда для этих же целей условные обозначения литологического состава придают ориентировки по простиранию слоистости. Нами показано, что эти векторные линии представляют собой сечения семейств поверхностей, разработана методика их построения путем интерполяции элементов залегания и продемонстрировано, что они могут играть не только вспомогательную роль, но и служить предметом строгого анализа. Первоначально указанная методика применялась при структурно-геологических исследованиях в Корякском нагорье, где значительная часть территории сложена именно мощными отложениями с отчетливой тонкой слоистостью [10]. В то время вычислительной техникой мы не располагали, и процедуры, необходимые для определения промежуточных значений, сводились к графическим построениям. Позднее на базе этой методики было разработано несколько вариантов программ, с помощью которых такие построения осуществляются автоматически. Исходные данные (координаты точек наблюдения, углы и азимуты падения) вводятся, преобразуются во внутренний формат и сохраняются в памяти. При необходимости, кроме того, вводятся контуры интрузивных тел, разломы, стратиграфических несогласий и другая информация.

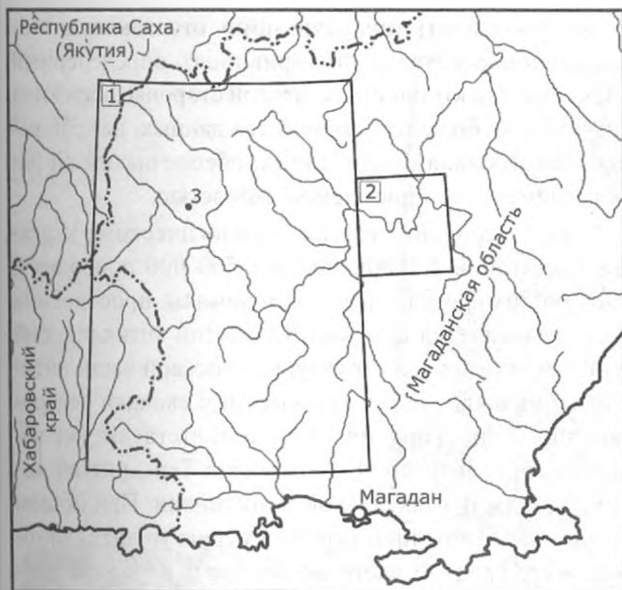


Рис. 5. Схема расположения объектов моделирования.

1 – территория, охватывающая Аян-Юряхский антиклинорий и примыкающие структуры. 2 – междуречье Колымы-Оротукан, 3 – участок Чай-Юрья.

ция, которую необходимо учитывать при построении структурных линий. Работа программы сводится к преобразованию данных к виду, позволяющему вычислять простирания, направления и углы падения в любой точке. С помощью специальной процедуры производится предварительная рисовка линий, отражающая структуру вычисленного векторного поля. Полученный таким образом рисунок позволяет выделять участки с непрерывными залеганиями, соответствующие фрагментам складчатых структур, и линии, на которых непрерывность нарушается. Последние свидетельствуют о наличии разрывных нарушений или стратиграфических несогласий. Линии, полученные в результате предварительной рисовки, анализируются, сопоставляются с выявленными ранее геологическими границами, при необходимости редактируются и сохраняются в специальном векторном формате. Линии простирания образуют структурную схему, которая может быть воспроизведена на экране, выведена на печать или преобразована к виду, поддерживаемому популярными графическими редакторами. Построенные таким способом схемы позволяют судить о характере складчатости, взаимоотношениях между складчатыми и дизъюнктивными структурами, о характере деформаций, сопровождающих внедрение интрузивных тел. Представление слоистых тел семействами непересекающихся поверхностей положено в основу программ, позволяю-

щих производить экстраполяции с горизонтальной плоскости на глубину, т.е. по результатам наземных исследований создавать трехмерные модели геологических структур.

Как упоминалось выше, методика построения и анализа линий простирания изначально разрабатывалась для полевых исследований. Для предварительной рисовки линий простирания использовались все замеры слоистости, не вызывающие сомнения. При необходимости данные пополнялись за счет дополнительных маршрутов. После резкого сокращения полевых исследований для обработки стали доступны главным образом данные, содержащиеся на изданных геологических картах. Отображенные на них элементы залегания тоже могут быть предметом анализа. Но количество замеров, показанных на карте, в большинстве случаев значительно меньше, чем было получено в процессе геологической съемки. Данные, снятые с карты, в отличие от замеров, производимых непосредственно в полевых условиях, мы контролировать не можем. Поэтому целесообразно составлять схемы по серии листов, а масштабы их делать мельче, чем масштабы исходных карт.

Ниже приводятся результаты практического применения данных программ для изучения некоторых геологических объектов, расположенных на территории Магаданской области (рис. 5).

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТРУКТУР АЯН-ЮРЯХСКОГО АНТИКЛИНОРИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СРЕДНЕМАСШТАБНОГО КАРТИРОВАНИЯ

Эта работа сводится к обобщению, генерализации и анализу результатов обработки фактического материала, отображенного на картах масштаба 1:200 000, и сопоставлению выявленных структурных линий с границами, отображенными на мелко-масштабных геологических картах. Примером такой работы может служить анализ, произведенный для изучения структур Аян-Юряхского антиклинория.

Аян-Юряхский антиклинорий является одним из крупных структурных элементов Яно-Колымской складчатой зоны. Он протягивается в северо-западном направлении на 500 км, при ширине около 90 км, охватывая бассейны рр. Аян-Юрях, Кулу, Тенька и Детрин. По существующим представлениям, антиклинорий сложен породами преимущественно пермского возраста, при участии триасовых отложений на его крыльях и замыканиях. В пределах антиклинория пермские отложения подразделяются на свиты: родионовскую, пионерскую (бывшая тасская свита), атканскую, омчакскую (бывшая нерючинская) и старательскую (бывшая кулинская). Все свиты представ-

лены аргиллитами, алевролитами, песчаниками, реже конгломератами и вулканогено-осадочными образованиями различного гранулометрического состава. Основную часть антиклинория, составляя его ядро, занимают крупные складки (с северо-востока на юго-запад): Колымская антиклиналь, Таяхтакская синклиналь, Тенькинская антиклиналь. Эти крупные складки, сложенные в основном породами пермского возраста, вытянуты вдоль оси антиклинория. Юго-восточное замыкание антиклинория усложняется разноориентированными складками и их фрагментами. На северо-западном замыкании угадываются веерообразно расходящиеся линейные складки. На юго-востоке и в центральной части структуры антиклинория прорваны крупными интрузивными телами преимущественно гранитоидного состава. На северо-западе количество интрузий незначительно. Аян-Юряхский антиклинорий разбит большим количеством разломов, в основном параллельных его оси. С северо-востока антиклинорий граничит с Иньяли-Дебинским синклинорием по Чай-Юрьинскому разлому. На юго-востоке антиклинорий сочленяется с Арmano-Вилигинским синклинорием, на юго-западе же находятся Верхнеиндигирский синклинорий, Инья-Челомжинская зона пологих дислокаций и Охотский массив. На юге на антиклинорий наложены структуры Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

Являясь, как отмечено, одной из ключевых тектонических единиц, антиклинорий служит индикатором процессов формирования всей Яно-Колымской складчатой системы, так что изучение характера складчатых и разрывных дислокаций в его пределах и в прилегающих тектонических элементах помогает пониманию процессов формирования структуры всего региона. Кроме того, в его пределах расположены многочисленные рудопроявления и месторождения золота, олова и других полезных ископаемых, что вызывает интерес не только с научной, но и с практической точки зрения.

Для первичного анализа морфологии структурных элементов антиклинория и пограничных с ним структур составлена карта, изображающая линии простирания, построенные по элементам залегания, содержащимся на государственных геологических картах м-ба 1:200 000 (рис. 6). Всего с 25 листов, покрывающих данную территорию, вынесено около 5000 элементов. Такая плотность замеров обеспечивает достаточно высокую достоверность исходного материала. В то же время, работа с таким большим количеством данных порождает определенные трудности. С одной стороны, эти трудности связаны с необходимо-

стью производить генерализацию, отсеивающую второстепенные детали, что привносит определенный элемент субъективности. С другой стороны, обработка значительно большего количества данных, нежели ранее, потребовала оптимизации, обеспечивающей работу программ с приемлемой скоростью.

Сопоставление схемы с геологическими картами масштабов 1:1 000 000 и 1:500 000 приводит к следующим результатам. По линиям простирания четко выделяется сам Аян-Юряхский антиклинорий и обрамляющие его структуры. В осевой части антиклинория выделяются три крупные складки северо-западного простирания. Они соответствуют уже известным структурам: Колымской и Тенькинской антиклиналям и Таяхтахской синклинали. При общем северо-западном простирании структур антиклинория, в его средней части по долине р. Берелёх отчетливо проявляется коленообразный изгиб, выраженный в довольно резкой смене простираний шарнирных складок. В восточной части территории выявляется серия разрывных нарушений, отделяющих антиклинорий от прилегающих к нему структур Иньяли-Дебинского синклинория. Эта система нарушений соответствует Чай-Юрьинской зоне разломов, причем как и на мелкомасштабных геологических картах эта зона делится на две части: юго-восточную и северо-западную с резкой сменой направления в среднем течении р. Кулу от запад-северо-западного к север-северо-западному (изменение направления структур составляет 5–10°). Соответствие результатов формализованных построений результатам геологического картирования свидетельствует, с одной стороны, о корректности исходного материала, а с другой — о работоспособности применяемых алгоритмов и созданных на их основе программ.

В то же время, с помощью линий простирания выявляются элементы, не получившие столь отчетливого выражения на средне- и мелкомасштабных картах. Так, на юго-восточном замыкании антиклинория выделяются несколько более мелких изометрических и вытянутых складок и их фрагментов, обрамляющих юго-восточную границу антиклинория. По разрозненным элементам широтная ориентировка структур угадывается и в пределах примыкающей с юга части Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП).

Совершенно по-другому устроено северо-западное замыкание антиклинория. Здесь преобладают длинные узкие складки, распадающиеся на две ветви. Одна из них, восточная, сохраняет генеральное простирание антиклинория. Другая, западная, отклоняется к западу. Пространство между ветвями пре-

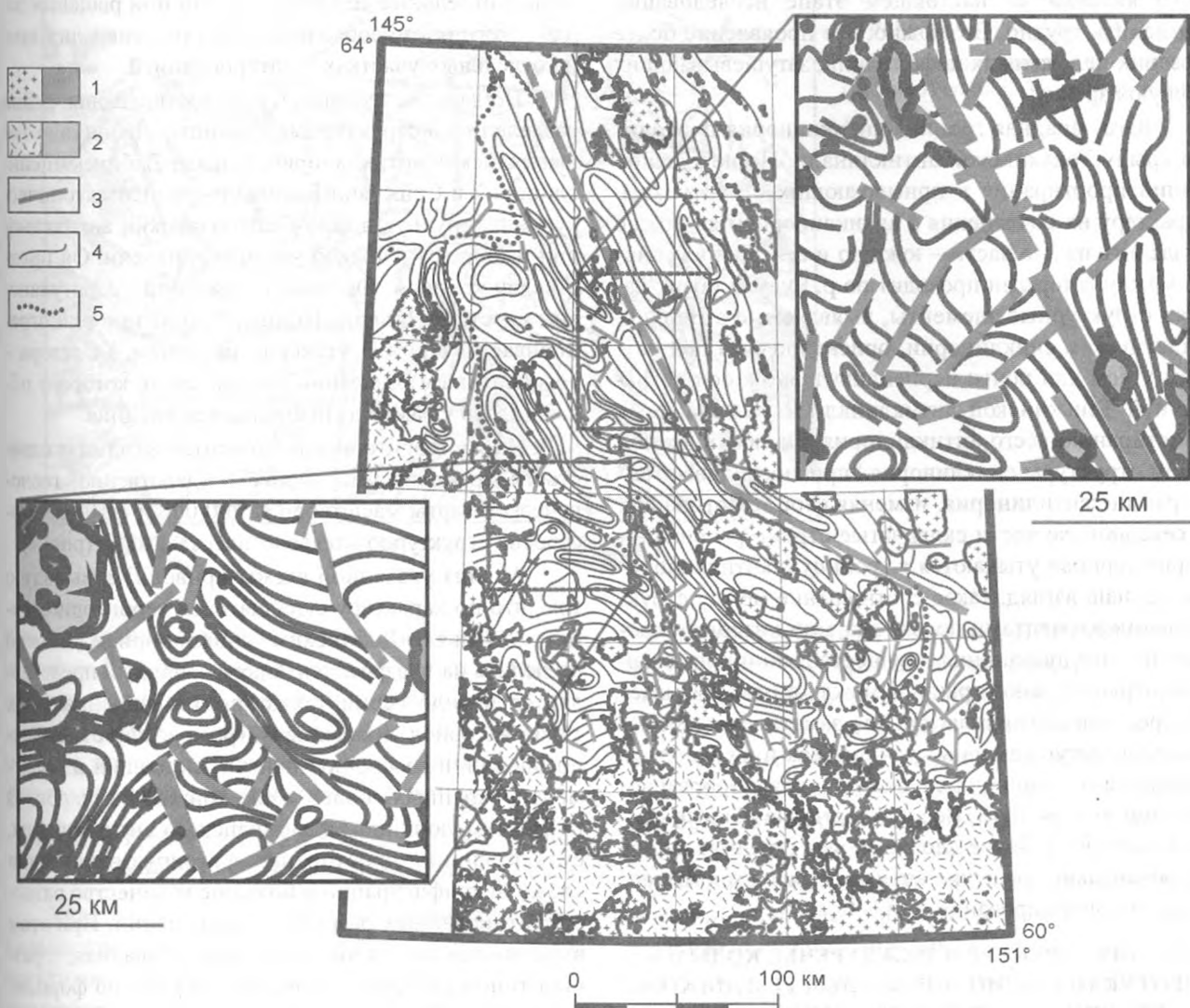


Рис. 6. Схема, изображающая в генерализованном виде линии простирания, построенные на территорию Аян-Юряхского антиклинория и прилегающих структур по данным среднемасштабного геологического картирования.

1 – интрузии, 2 – вулканиты ОЧВП. 3 – выявленные разрывные нарушения, 4 – структурные линии, 5 – условная граница Аян-Юряхского антиклинория. На врезках показан характер поведения линий простирания у границ антиклинория.

ставляется в виде вклинивающегося блока, внутри которого различаются фрагменты складок, discordантных обеим ветвям. И на севере, и на юге между крупными складчатыми структурами выделяется множество мелких фрагментов, расшифровать которые на данном этапе не удастся.

Дополнительную информацию дает анализ поведения линий простирания, примыкающих к Чай-Юрьинской зоне разломов. Южная часть зоны распадается на серию разрывов, ориентированных вдоль нее. На севере зоны фиксируется множество наруше-

ний, поперечных к ее общему простиранию. И на севере, и на юге зона трассируется фрагментами узких линейных складок, ориентированных вдоль зоны. Однако примерно в середине северной части зоны, на участке протяженностью порядка 20 км, проявляются только поперечные разрывы, а линии простираения слоистости зону пересекают. На листе геологической карты Р-55-ХVI в этом месте изображен небольшой блок триаса, вдающийся в структуры антиклинория со стороны Иньяли-Дебинского синклинория поперёк Чай-Юрьинского разлома. Причину дан-

ного явления на настоящем этапе исследований объяснить трудно. Возможно, это проявление более поздних наложенных деформаций, затушевывающих общую картину.

Юго-западная граница антиклинория проходит по крылу Тенькинской антиклинали. По поведению линий простираения в примыкающих структурах и характеру их сочленения с антиклинорием ее можно разделить на две части – южную и северную, граница между которыми проходит по р. Кулу. В обеих частях структурные элементы, выявляемые в Верхнеиндигирском синклинии, ориентированы под острым углом или почти перпендикулярно к оси пограничной Тенькинской антиклинали и генеральному простираению всего антиклинория. Однако в южной части структуры синклиния “приспосабливаются” к границе антиклинория, изменяя свои простираения. В северной же части складчатые структуры синклиния торцово утыкаются в границу с антиклинорием. На наш взгляд, такое соотношение между структурными элементами нельзя разумно интерпретировать без предположения о существовании протяженной дизъюнктивной границы между ними. Вызывает интерес и то обстоятельство, что заметное изменение стиля структур как на восточной, так и на западной границе антиклинория совпадает с коленообразным изгибом внутри него. Все приведенные данные свидетельствуют о более сложном, чем представлялось первоначально, строении антиклинория и многоэтапности его формирования.

АНАЛИЗ СТРУКТУР В МЕЖДУРЕЧЬЕ КОЛЫМА-ОРОТУКАН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ КРУПНОМАСШТАБНОГО КАРТИРОВАНИЯ

Методика таких работ подразумевает ввод данных с геологических карт (в первую очередь элементов залегания) и первичную обработку, которая сводится к построению и анализу линий простираения слоистости для составления среднемасштабных структурно-морфологических карт. Проблема состоит в том, что среднемасштабные карты, составленные в процессе государственного картирования территории СССР, не учитывают результаты более поздних крупномасштабных работ. В то же время, крупномасштабные карты, отражая детали строения отдельных частей структур более высокого ранга, не дают представления о характере складчатых и разрывных деформаций в целом. Обобщение и генерализация деталей для последующего отображения на среднемасштабных картах становится одной из главных задач при работе с такими материалами. Сложность обостряется тем, что крупномасштабные карты, как правило, покрывают не всю территорию, а

только отдельные ее части. Так что при решении задач такого рода необходимо сочетать генерализацию на отдельных участках с интерполяцией.

По данным геологического картирования, район разделен на 3 структурные единицы – Буюндино-Балыгычанский антиклинорий, Иньяли-Дебинский синклиний и Сеймчано-Буюндинскую неотектоническую впадину. Буюндино-Балыгычанский антиклинорий находится в южной части территории. Он представлен крупной глыбовой структурой – Оротуканским горстом. Иньяли-Дебинский синклиний ограничивается с юга Паутовским разломом, а с севера – региональным разломом Улахан, вдоль которого образовалась Сеймчано-Буюндинская впадина.

На эту территорию по элементам залегания слоистости, показанным на листах государственной геологической карты масштабов 1: 200 000 и 1:50 000, построена структурно-морфологическая схема (рис. 7).

Анализ указанной схемы приводит к выводу о том, что по характеру складчатости территорию, занятую Иньяли-Дебинским синклинием, можно разделить на два фрагмента: юго-западный представляется в виде серии узких, почти изоклинальных складок, ориентированных строго в широтном направлении, и северо-восточный, состоящий из фрагментов крупных, более изометричных складок. В пределах Буюндино-Балыгычанского антиклинория, судя по линиям простираения, фиксируются складки сложной конфигурации и большое количество разноориентированных разрывных нарушений. При этом выделяются две части, восточная и западная, с разным типом складок, различающихся как по формам, так и по преобладающим простираениям. По участкам, на которых линии простираения сливаются в одну линию или резко меняют направления, выделяются нарушения непрерывности залеганий, которые можно интерпретировать как разрывные нарушения. Указанные нарушения можно разделить на два типа. Нарушения первого типа четко выделяются в виде прямых или незначительно изогнутых линий. В большинстве случаев они характеризуются протяженностью в первые километры и вызывают локальные усложнения складчатых структур. Нарушения второго типа проявляются в виде протяженных прямых или плавно изогнутых линий, которые в большинстве случаев распадаются на фрагменты, часто разобщенные разрывами первого типа. Этим нарушениям соответствуют либо границы главных структурных единиц, либо границы между крупными фрагментами внутри них. Примером нарушений второго типа является линейная зона, в пределах которой фиксируется множество мелких нарушений.

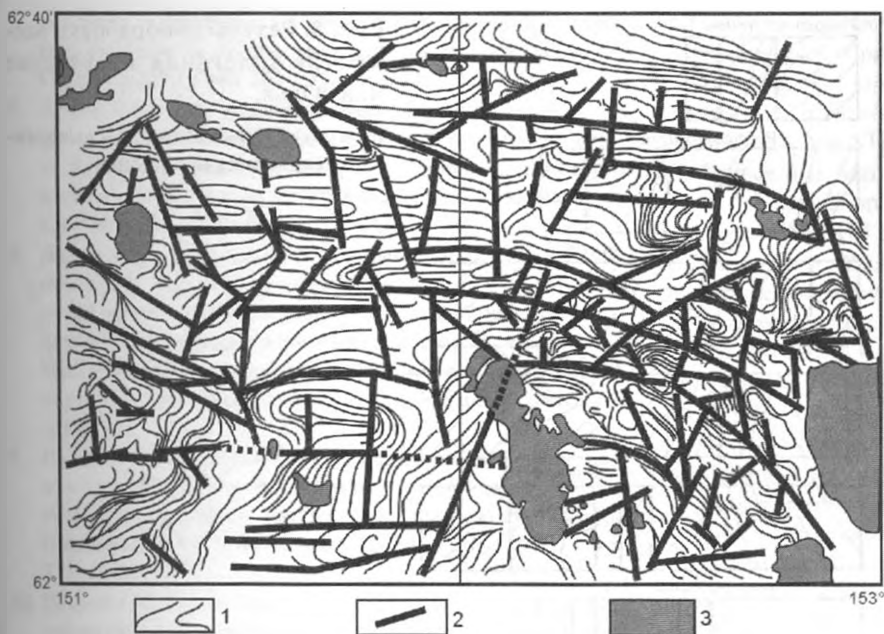


Рис. 7. Структурная схема междуречья Колыма-Оротукан.

1 — линии простираения, 2 — разрывные нарушения, 3 — интрузивные тела.

Южная граница этой зоны соответствует хорошо известному Паутовскому разлому. Имеются и другие примеры совпадения нарушений, выявленных с помощью анализа, с закартированными дизъюнктивами. В то же время, выявляются нарушения, не получившие отражения на геологических картах.

АНАЛИЗ СТРУКТУР НА УЧАСТКЕ ЧАЙ-ЮРЬЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДЕТАЛЬНЫХ РАБОТ

Участок Чай-Юрья, расположенный в Верхне-Колымском районе на границе Иньяли-Дебинского синклиория и Аян-Юрхского антиклиория, давно привлекает к себе пристальное внимание, так как в этом месте располагается одно из крупнейших в мире россыпное месторождение золота. В коренных осадочных породах пермского, триасового и юрского возраста на этом участке выявлено наличие и рудной минерализации, но поиски коренного месторождения, сопоставимого с россыпным, успехом не увенчались. В рамках этой проблемы встал вопрос о возможной связи рудоносности со складчато-разрывными структурами. Результаты геологического картирования 1:200 000, 1:50 000 и 1:10 000 масштабов отчетливого ответа на этот вопрос не дали. Для этих целей и были проанализированы данные, содержащиеся на картах всех трех масштабов.

Анализ линий простираения, построенных по данным геологической карты м-ба 1:200 000, позволил выделить три системы разрывных нарушений: северо-западную, северо-восточную и субширотную. Из них только северо-западная система отчетливо отражена на всех геологических картах. Она соответ-

ствует двум глубинным разломам: Нексиканскому и Чай-Юрьинскому, играющим ключевую роль в строении региона. Две другие системы нарушений, которые могут интерпретироваться как оперяющие, на геологических картах отражены слабо. Между тем, об их наличии свидетельствуют нарушения непрерывности залеганий, выявляемые при построении линий простираения. Указанные нарушения выявляются и при анализе данных, содержащихся на картах более крупных масштабов (1:50 000 и 1:10 000). С помощью линий простираения на них удастся не только выявить нарушения, но и оценить характер сопровождающих складчатых дислокаций. В пределах проанализированного участка Чай-Юрьинский разлом с востока трассируется ундулирующей антиклинальной складкой, фрагментированной разрывными нарушениями более высоких порядков и осложненной наложенной поперечной складчатостью, приуроченной к субширотным разрывным нарушениям.

Для детального анализа структур, примыкающих к Чай-Юрьинской россыпи, использована программа, позволяющая, в числе прочего, автоматически строить профильные разрезы по любому направлению. Структурная карта и серия параллельных разрезов, построенных с помощью этой программы, позволили получить дополнительную информацию о характере складчатых и разрывных нарушений [6] (рис. 8). Разрывы, выявленные в результате построения линий простираения, подчинены трем основным направлениям: северо-западному, совпадающему с простираением Чай-Юрьинского разлома, северо-восточному и субширотному. Отчетливо вырисовывает-

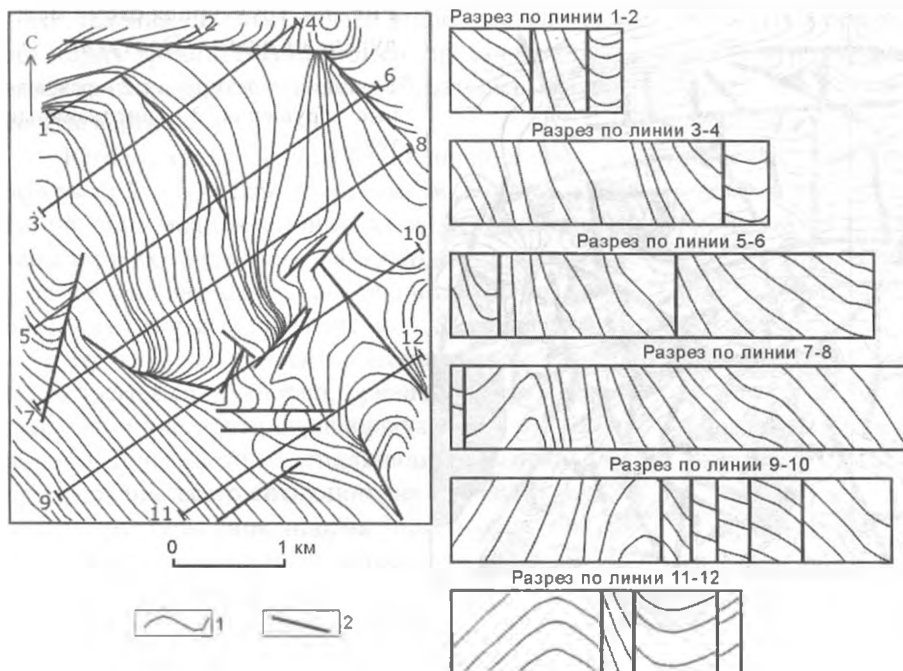


Рис. 8. Результат обработки элементов залегания на участке Чай-Юрья.

1 – структурные линии, 2 – выявленные разрывные нарушения.

ся складчато-разрывная структура, состоящая из крупной антиклинальной складки, переходящей на флангах в синклинали. Простирающие шарниры складок преимущественно северо-западное, но они неоднократно меняют направление и ундулируют. Шарнир антиклинали явно выражен только на северо-западе и северо-востоке участка. В центральной части отчетливо отражается только ее приподнятое северо-восточное крыло с постоянно меняющимися углами падения. Юго-восточнее центральной части антиклиналь осложнена складками более высокого порядка и разбита системой поперечных разрывных нарушений. Аналогичным образом ведут себя и синклинали: на севере и юге шарниры складок выражены отчетливо, а в центральной части не прослеживаются. Сопоставление структурных элементов с данными по опробованию привело к выводу о том, что участки с наиболее высокими содержаниями приурочены к системе разрывов северо-восточного простираения, нарушающей общую северо-западную ориентировку линейных складок (рис. 8).

Программы, с помощью которых получены описанные выше результаты, написаны на языке C++. В приведенных примерах данные вводились как непосредственно с растровых изображений карт, так и из баз данных. Файлы, в которых содержится информация о структурных линиях, могут быть преобразованы в форматы, поддерживаемые конкретными геоинформационными системами. При необходимости программы, созданные на тех же принципах, могут быть встроены в саму ГИС как одно из приложений.

В заключение авторы считают уместным еще раз обратить внимание создателей геоинформационных систем геологического содержания на необходимость уделять внимание способам ввода и хранения первичной геологической информации, в том числе элементам залегания. Необходимо разделять данные, которые следует отображать на электронных вариантах геологических карт для лучшего восприятия, данные, которые можно использовать для компьютерной обработки и получения новой информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов Ю.Б., Берлянт А.М., Кошкарёв А.В. и др. Толковый словарь по геоинформатике / Под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарёва. Изд. на CD-ROM. ГИС-обзор 1998. Изд. в Интернете: http://www.ihst.ru/project_linglossary/glos_g.htm.
2. Ворошин С.В., Мельник В.Г., Голубенко И.С. и др. Введение в региональные геоинформационные системы: Учебное пособие. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2003. 145 с.
3. Горячев И.Н. Компьютерное моделирование морфологии и геодинамики юго-восточной части Аян-Юрхского антиклинория // Геодинамика, магматизм и минерализация континентальных окраин Севера Тихого океана: Материалы 3-х т. Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2003. Т. 1. С. 83–85.
4. Казаков А.Н. Геометрический анализ складчатых структур с помощью стереограмм // Геологическая съемка сложнослоистых комплексов: Метод. пособие по геологической съемке м-ба 1:50 000. Вып. 6. Л.: Недра, 1978. С. 28–48.
5. Ласло М. Вычислительная геометрия и компьютерная графика на C++. М.: Изд-во Бином, 1997. 304 с.
6. Лямин С.М. Изучение взаимосвязи структур и рудопроявлений на участке Чай-Юрья с помощью компьютерной

- программ // Проблемы геологии и металлогении Северо-Востока Азии на рубеже тысячелетий. В 3-х т. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. Т. 2. С. 172–176.
7. Лямин С.М. Использование компьютерных технологий при изучении геологической структуры (на примере хребта Кэнкэрэн, Корякское нагорье) // Применение персональных ЭВМ в геологических исследованиях. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. С. 53–60.
 8. Лямин С.М., Гревцев А.В. Трехмерное моделирование осадочных структур как инструмент изучения потенциально нефтегазоносных осадочных бассейнов на примере центральной части Северо-Охотской системы прогибов // Геодинамика, магматизм и минерогения континентальных окраин Севера Пацифики: В 3-х т. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 2. С. 27–31.
 9. Пахомов А.Ю., Лямин С.М. Модель тектонических движений в Магаданской впадине // Геодинамика, магматизм и минерогения континентальных окраин Севера Пацифики: В 3-х т. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2003. Т. 1. С. 253–255.
 10. Петров А.Н. Геометрические модели слоистых тел и картирование сложнорасчлененных толщ путем интерполяции элементов залегания (методические рекомендации). Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1988. 60 с.
 11. Петров А.Н., Кашина А.П., Чехов Д.А. Трехмерное моделирование складчатых структур с помощью стратиграфических координат // Научно-технический прогресс и политехническое образование на Северо-Востоке России: Материалы науч.-практ. конф. “Проблемы геологии, строительства и автотранспорта на Северо-Востоке России”. Магадан: Мф ХТГУ, 1996. С. 12–13.
 12. Петров А.Н. Математическое моделирование тектонических движений при изучении геологических структур. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. 130 с.
 13. Петров А.Н., Кашина А.П., Серова С.Н., Чехов Д.А. Математические методы и разработка компьютерных программ для геологических исследований // Применение персональных ЭВМ в геологических исследованиях. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. С. 6–22.
 14. Петров А.Н. Математические методы в геологии: Учеб. пособие. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. 189 с.
 15. Петров А.Н. Численные модели геологических структур и программное обеспечение геологических исследований // Материалы XXXVI совещания “Тектоника и геодинамика континентальной литосферы”. М.: ГЕОС, 2003. Т. 2. С. 110–113.
 16. Фокс А., Пратт М. Вычислительная геометрия. М.: Мир, 1982. 304 с.
 17. Шикин Е.В., Плис А.И. Кривые и поверхности на экране компьютера: Руководство по сплайнам для пользователей. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. 240 с.

Поступила в редакцию 22 мая 2006 г.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым

A.N. Petrov, I.N. Goryachev, S.M. Lyamin

Geometric models of geological structures, and geoinformation systems

The problems of construction and analysis of geometric models of geological structures are discussed. The approach to the creation of geometric models in the form of surface communities, and its particular realization involving the method of construction and analysis of lines of strike are described. The results of application of the programs that realize this method are offered for the study of some geological objects of Northeast Russia. Great attention is paid to the necessity of entering primary data into the geoinformation systems. These primary data include measurements of elements of occurrence.

Key words: GIS technologies, elements of occurrence, geometric models, geological structures.