

Ш. А. ГУБЕРМАН

**НЕФОРМАЛЬНЫЙ
АНАЛИЗ
ДАННЫХ
В ГЕОЛОГИИ
И ГЕОФИЗИКЕ**



МОСКВА "НЕДРА" 1987

Губерман Ш. А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике.— М.: Недра, 1987.— 261 с.

Дан анализ неформальной деятельности геолога и геофизика, связанной с постановкой задачи, выбором объекта исследования, способом описания объекта и т. п. при решении с помощью математических методов и ЭВМ типичных геологических задач (комплексная интерпретация данных, корреляция разрезов, прогноз месторождений полезных ископаемых и др.). Рассмотрены проблемы выделения, описания и классификации геологических объектов, использования априорной информации, системного анализа данных, построения моделей, оценки результатов.

Для геологов и геофизиков научно-исследовательских организаций, математиков и программистов, работающих в геологии, специалистов по информатике.

Табл. 35, ил. 62, список литературы — 50 назв.

Рецензент: *А. Н. Дмитриевский*, д-р геол.-минер. наук (Московский институт нефти и газа им. И. М. Губкина)

Земля — наш общий дом и непосредственный источник нашей жизни. Недаром самое сильное впечатление первых космонавтов — картина Земли, охватываемой одним взглядом. Большая трудность в изучении Земли связана как раз с тем, что она у нас одна и у наук о Земле нет ансамбля объектов исследования, а значит и нет воспроизводимых экспериментов, на которых основаны современные естественные науки. Эта трудность особенно сильно сказывается в изучении «твердой» Земли, не доступной (кроме немногих первых километров) прямым наблюдениям. Проникнув в космос на десятки миллионов километров, мы до сих пор лишь в одной точке Земли достигли глубины более 10 км. Правда, данных о «твердой» Земле у нас немало: их собирают тысячи геофизических обсерваторий, а первые километры земной коры пройдены десятками тысяч скважин и шахт. И здесь мы встречаем другую трудность, связанную с выделением в массиве имеющихся данных адекватной иерархии объектов научного исследования.

Научно-техническая революция принесла в нашу жизнь необходимость осмысливать большой объем непривычно разнообразной информации и растерянность перед этой задачей часто отражается в термине «информационный взрыв». Естественная защита от него — прятать голову под крыло: рассматривать часть фактов в рамках какой-либо сложившейся дисциплины или укладывать факты в хорошо разработанную теорию. Однако это не всегда удается. Например, в той области физики Земли, которой приходится заниматься мне, необходимо совместно анализировать данные тектоники, геоморфологии, физики «твердой» Земли и многих разделов других наук от физики твердого тела до экономики и археологии; а между тем каждое из перечисленных направлений исторически разделено на ряд довольно обособленных дисциплин. Что же касается теории, то необходимо моделировать взаимодействие упруго-пластических деформаций, теплового потока, фазовых и петрохимических переходов и миграции флюидов и эта задача выходит далеко за пределы нашей традиционной теоретической базы — механики сплошных сред.

Таким образом, отвечая запросам современного общества, мы должны делать относительно точные высказывания о минеральных ресурсах, об опасности землетрясений и т. п. в отсутствие точной теории, удовлетворяющей современным научным стандартам. В этих условиях особенно большую роль играет интуиция исследователя, его, если можно так выразиться, образное мышление. Я не уверен, что эта роль уменьшится в дальнейшем с развитием теории.

Предлагаемая вниманию читателей книга Ш. А. Губермана как раз и посвящена исследованиям, в которых формализованный, строгий подход приходится сочетать с интуитивным. В книге подводятся итоги исключительно успешных, на мой взгляд, многолетних исследований по анализу многоплановой информации, относящейся к «твердой» Земле. Я помню, как при первом знакомстве с работами Ш. А. Губермана в 1972 г. меня поразила непривычная, казалось бы переформализованная до абсурда форма представления критериев распознавания мест, где возможны сильные землетрясения. Однако с тех пор землетрясения продолжают происходить именно в распознанных местах. Мало того, эти критерии послужили одним из первых указаний на признанную сейчас важную роль флюидов в подготовке сильных землетрясений. Академик А. Н. Крылов говорил, что математическая мельница может выдать только то, что в нее было заложено. Результаты, полученные Ш. А. Губерманом, свидетельствуют о том, что он сумел в избранный им способ формализации критериев распознавания образов вложить нечто большее, чем кажется на первый взгляд. Трудно даже ретроспективно восстановить ход его рассуждения при постановке задачи, да в этом едва-ли есть необходимость. Интуиция пока еще не формализуется.

Изложение строится вокруг конкретных задач по прогнозу мест возникновения сильных землетрясений, поиску и разведке полезных ископаемых, корреляции геологических разрезов и т. п. Конкретные результаты автора сопровождаются комментариями теоретико-познавательного свойства. Они, естественно, не претендуют на однозначность, но полезно балансируют алгоритмизацию. Методическое единство в решении весьма разнообразных задач делает эту книгу полезной для всех, кто интересуется интеграцией наук о «твердой» Земле или новыми подходами к этим наукам.

Академик М. А. САДОВСКИЙ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга посвящена исследованию неформальных аспектов деятельности геолога и геофизика в процессе решения геологических задач, связанных с анализом данных — выделением геологических тел, расчленением разрезов, корреляцией разрезов, построением прогнозных карт, комплексной интерпретацией геологических и геофизических данных, определением водонефтяного контакта и некоторых других. Интерес к этой проблеме вызван использованием в геологии и геофизике математических методов и вычислительной техники, особенно интенсивным в последние четверть века. Использование известных математических методов обработки данных составляет лишь один этап общего процесса решения геологической задачи.

В процессе решения любой задачи необходимо также реализовать ряд других этапов: постановка задачи, выбор объекта исследования, выбор описания объекта, задание априорной информации, оценка результата и его интерпретация. Для успешного решения геологических задач на ЭВМ необходимы тщательный и глубокий анализ всех этих этапов и их формализация. Без этого невозможна эффективная автоматизация обработки геологических данных. Вместе с тем анализ и формализация деятельности геолога и геофизика нужны не только для создания алгоритмов для ЭВМ. Осознание принципов своей работы помогает профессионалу повысить эффективность повседневной работы, даже если она не связана с применением вычислительных машин.

Проблема повышения эффективности использования математических методов и вычислительных машин заботит не только геологов, но и специалистов других областей, не связанных с применением математики (медиков, биологов, психологов, литературоведов и др.). При первых же столкновениях с реальным материалом стало ясно, что те испытанные общие принципы, с которыми математики подходили к физическим и техническим задачам, в этих новых областях плохо применимы. Оказалось, что решение геологической или медицинской задачи, которое может быть получено существующими математическими методами, зависит от многих обстоятельств: выбора исходных данных, выбора критерия проверки, учета априорных знаний и др.

Поскольку процедуры принятия решений по всем этим вопросам не имеют формального характера, то эта часть работы прделывается неформально и всецело зависит от знаний, опыта, интуиции и здравого смысла специалиста. Попытки формализации этих процедур на основе имеющихся матема-

тических методов вызывают большие трудности. Поэтому представляется важным анализ неформальных этапов деятельности при решении таких задач.

Рассмотренный круг проблем относится к той области науки, которая называется анализом данных. Термин этот возник не так давно. Раньше эта область деятельности называлась обработкой результатов наблюдений. Возникновение нового термина явилось отражением нового содержания. Суть этого нового содержания выразил крупный специалист в области математической статистики Дж. Тьюки, предложивший сохранить термин «анализ данных» только за такими процедурами обработки данных, которые не допускают формального алгоритмического подхода. В 1982 г. переведена книга Ф. Мостеллера и Дж. Тьюки в двух томах «Анализ данных и регрессия». Это первые монографии по анализу данных на русском языке. В предисловии к книге Ф. Мостеллера и Дж. Тьюки, написанном членом редколлегии серии «Математико-статистические методы за рубежом» Ю. П. Адлером, дан краткий и содержательный перечень основных особенностей современного анализа данных.

Во-первых, анализ данных предполагает анализ постулатов, заложенных в основу рассматриваемой модели: их варьирование и рассмотрение последствий такого варьирования. Одни и те же данные можно рассматривать как числа (детерминированная модель), как случайные величины (стохастическая модель) или как логические переменные (дескриптивная модель) и выбирать тот ответ, который лучше отвечает требованиям конкретной задачи. Такой подход соответствует принципу дополнительности Бора.

Во-вторых, анализ данных проводится с целью максимального использования внешней информации, содержащейся в наших априорных знаниях о мире и его законах. Эта информация позволяет резко сократить множество допустимых решений, отделить разумные решения от неразумных. Такой подход предполагает выделение объекта и его окружения или фона и тем самым (вольно или невольно) вовлекает в свою орбиту вопросы психологии восприятия.

В-третьих, важной психологической особенностью ситуации, характерной для анализа данных, является периодический возврат к одним и тем же данным. Отсюда — шаговый принцип анализа данных, дающий возможность остановок и управления дальнейшей обработкой.

Книга посвящена анализу данных в геологии и геофизике именно в таком аспекте. Однако в современной литературе распространено более широкое и более расплывчатое толкование термина «анализ данных» как области прикладной математики, занимающейся выявлением закономерностей в массивах эмпирических данных. Поэтому в названии книги использован термин «неформальный анализ данных», подчерки-

вающий то понимание анализа, которое подробно излагалось выше.

Первая часть книги посвящена решению геологических и геофизических задач с помощью методов распознавания образов. В ней рассмотрены различные этапы решения задач распознавания: постановка задачи, выбор объекта распознавания, описание объекта, выбор материала обучения, интерпретация результатов. Особое внимание уделяется методам проверки эффективности решающего правила. Все изложение строится вокруг конкретных задач (выделение нефтеносных пластов, прогнозирование мест сильных землетрясений). Без подробного рассмотрения решения задач и получающихся результатов общие рассуждения о том, как надо решать задачи, выглядели бы неубедительно.

Во второй части рассматриваются вопросы использования априорной информации при решении геологических и геофизических задач. В традиционных методах геологической и геофизической интерпретации априорная информация используется постоянно, однако трудно поддается осознанию. Поэтому возникает задача анализа деятельности геолога и геофизика, а после вскрытия способов использования априорного знания — создание на их основе формальных алгоритмов.

Основные задачи, которые рассмотрены в этой части, — механизм накопления опыта прогнозирования при переходе на новые площади, определение водонефтяного контакта, корреляции разрезов скважин и их геологическая интерпретация.

В третьей части книги рассматривается целостный подход. Анализ показывает, что многие фундаментальные процедуры геологической работы (например, выделение геологических тел и границ, расчленение и корреляция разрезов) имеют целостный характер. Целостность подхода проявляется в том, что интерпретация части зависит от всего остального. Создание алгоритма, реализующего целостный подход, позволило четко сформулировать основные принципы целостного подхода, показать его связь с теорией систем, с одной стороны, и гештальтпсихологией, изучающей законы целостного зрительного восприятия, с другой. Поскольку вся исходная геологическая информация поступает по зрительным каналам (обнажения, карты, схемы, разрезы, профили, шлифы и т. п.), то теория обработки геологических и геофизических данных не может строиться без учета законов восприятия изображений человеком.

Этим геология и геофизика коренным образом отличаются от большинства других областей, использующих анализ данных. Игнорирование этого обстоятельства, возможно, является одной из причин тех трудностей, на которые наталкивается внедрение математических методов в геологии.

Четвертая часть посвящена примерам построения моделей (или теорий) на основе анализа данных и способу управления

анализом данных на основе построенной модели. Показано, в частности, как модель сейсмичности Земли (теория Д-волн) позволяет по-новому проанализировать известные данные и выявить глобальные закономерности в геоморфологии, геотектонике и размещении крупнейших месторождений полезных ископаемых на Земле (нефть, газ, железо, хром, марганец, свинец, цинк).

Вопросы, которые обсуждаются в этой книге на геологическом и геофизическом материале, во многом совпадают с аналогичными проблемами в других областях знания, в первую очередь в медицине. Показателем этой общности является, в частности, то, что в ведущих коллективах нашей страны (в Институте прикладной математики АН СССР под руководством академика И. М. Гельфанда, в Вычислительном центре СО АН СССР под руководством доктора физико-математических наук Ю. А. Воронина) ведутся работы одновременно и по геологической и по медицинской тематике.

И в той и в другой области ведущая тематика посвящена прогнозированию, классификации, использованию опыта специалистов, целостному восприятию объекта исследования.

Из предыдущего должно быть ясно, что в книге излагаются вопросы, которые остаются в научных публикациях неосвещенными, ибо отражают нестрогость, а иногда и просто произвольность решений, которые приходится принимать в процессе анализа данных.

Открытое обсуждение приемов научной работы, которые раньше тщательно маскировались, — тенденция, присущая не только вычислительной математике, геологии или медицине нашего времени. Она имеет свои аналоги во многих других областях науки и культуры. В литературоведении большой интерес вызывают не только новые рукописи и портреты Пушкина, Лермонтова, Толстого, но и история их находок. В театре, который столько веков скрывал свои тайны за кулисами, на сцену вышли рабочие и декораторы, гримеры и костюмерши — их работа проходит часто на глазах у зрителей. На телевидении в кадре постоянно появляются микрофоны и камеры, которые раньше тщательно замаскировывались. В архитектуре появились здания, в которых наружу вынесена вся внутренняя техника — трубы, кабели, лифты, лестницы (Дворец искусств имени Помпиду в Париже). В кукольном театре актер вышел из-за ширмы и творит свое искусство на виду у зрителей. Стены парикмахерских сделаны из стекла.

Судя по всему, анализ данных есть закономерный продукт современных тенденций развития культуры. Тенденции эти носят глубоко демократический характер и отражают интерес и уважение человечества ко всякого рода труду.

Излагаемые в книге идеи, методы и результаты — итог работы автора в различных научных коллективах, многократного обсуждения этих проблем с коллегами на конференциях, семи-

нарах и в частных беседах. Автор рад возможности назвать тех, у кого он постоянно учился: академик И. М. Гельфанд, профессор В. И. Кейлис-Борок, доктор технических наук М. М. Бонгард, доктор физико-математических наук Ю. А. Воронин, А. Ш. Губерман и Э. М. Губерман; с кем автор работал над различными задачами: О. И. Барина, М. Л. Извекова, Е. Е. Калинина, Т. М. Марипов, М. И. Овчинникова, Ю. И. Пиковский, Е. Я. Ранцман, И. М. Ротвайн, И. М. Чуринова, М. А. Юхина, кто помогал автору осваивать новые области знания: Л. А. Исаева, Н. Ф. Овчинников, М. Л. Шик, Л. Т. Ямпольский.

Часть первая

НЕФОРМАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Глава I

АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ И РЕШЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Прошло уже более четверти века со времени появления первой работы Ф. Розенблатта [48] по распознаванию образов, а точнее, по обучению машины распознаванию зрительных образов на примерах. Предложенное в этой работе устройство для распознавания зрительных образов (персептрон) было моделью нервной сети, организация которой должна была в основных чертах повторить организацию зрительного анализатора человека. Однако, очень скоро выяснилось, что модель эта была слишком примитивной, и от нее пришлось отказаться. Персептрон был аналоговым вычислительным устройством, но вскоре стало ясно, что гораздо эффективнее реализовать такого рода модели на универсальных цифровых ЭВМ. Персептрон умел решать некоторые задачи распознавания образов после соответствующего обучения (например, отличать большие цифры от маленьких; фигуры, расположенные в правой части поля, от фигур, расположенных в левой части, вертикальные полосы от горизонтальных), однако в дальнейшем было показано, что ему недоступно множество достаточно простых задач распознавания (например, различение треугольников и окружностей и др. [2]). Несмотря на недостатки конструкции персептрона, сама постановка задачи обучения распознаванию с помощью показов оказалась исключительно удачной и привела к созданию нового направления, бурно развивавшегося в течение всей этой четверти века и повлиявшего на другие дисциплины. По этой проблеме опубликовано множество работ, созывается ежегодно множество конференций, выходят специализированные журналы, имеется международная ассоциация по распознаванию образов.

Конечно, все это внешние показатели бурного развития нового научного направления. Однако они несомненно свидетельствуют о неослабевающем интересе к этой теме, о практических успехах в этой области и об оптимистических прогнозах на будущее у многих ученых и инженеров. Вместе с тем накопленный материал дает возможность критически оценить проделанный путь и состояние проблемы распознавания об-

разов на сегодняшний день. Особенно нас будут интересовать задачи распознавания образов в широком аспекте и их приложения к проблемам геологии и геофизики.

Первая работа Ф. Розенблатта, посвященная устройству перцептрона, появилась в психологическом журнале «Psychological review», что довольно примечательно. Дело в том, что перцептрон был задуман как модель нервной системы человека для исследования когнитивных (познавательных) функций (памяти, обучения, обобщения и т. п.). Идея рассмотрения нервной системы как нейронной сети (сети из нейроноподобных элементов) восходит к классической работе Мак-Каллоха и Питса (1943 г.). Согласно их представлениям, каждой функции, каждому навыку соответствует в мозгу определенная схема из нейронов, реализующая ту или иную логическую функцию. Такая точка зрения вызвала критику со стороны ряда ученых, в том числе и Ф. Розенблатта, который считал, что в мозгу имеются не жесткие схемы, а пластичные структуры, способные изменяться в процессе обучения нужным образом. Неспецифичность этих структур, их начальная «бесструктурность» нашли отражение в устройствах со случайным характером соединений нейронов между собой.

В процессе обучения сила связей между элементами должна была изменяться и привести к формированию функционального блока. В качестве иллюстрации работы нервной сети со случайными связями была выбрана задача обучения распознаванию зрительных образов с помощью показа¹ примеров. Автор перцептрона не ставил своей целью решение какой-либо практической задачи распознавания образов, а лишь демонстрировал возможности своей модели. Он явно недооценил идею обучения на примерах и несколько переоценил возможности нейронных сетей со случайными связями. Такая ситуация возникала неоднократно в процессе развития работ по распознаванию образов и моделированию других функций мозга. Для применения в той или иной реальной задаче известных математических или вычислительных методов приходится прибегать к упрощениям. Иногда эти упрощения заходят слишком далеко. После решения такой выхолощенной задачи к ней теряется всякий интерес. Если же целью ставится не демонстрация силы тех или иных научных методов, а решение четко определенной (но не упрощенной) задачи, то приходится иногда разрабатывать новые методы, отражающие принципиальные особенности задачи и часто имеющие широкое применение. Таким образом, наряду с хорошо известным принципом: «нет ничего лучшего для практики, чем хорошая теория» справедлив и дополнительный принцип: «нет ничего полезнее для

¹ Когда говорят о «показе» изображения вычислительному устройству, подразумевают ввод в устройство матрицы чисел размером $n \times m$ — результат измерений яркости изображения в дискретных точках растра.

развития теории, чем трудная практическая задача». Мы еще не раз встретимся с примерами, иллюстрирующими это положение.

Далее будут описаны некоторые алгоритмы распознавания. Выбор их определяется двумя соображениями: 1) все они были предложены в первые годы развития методов распознавания образов и во многом определяли дальнейшее направление работ, 2) каждая из этих программ представляет целый класс алгоритмов, основанных на одинаковых исходных предпосылках. В литературе известны формальные классификации алгоритмов узнавания [8]. Однако данная работа посвящена неформальным аспектам анализа данных, поэтому мы стараемся оттенить в описаниях алгоритмов узнавания сущность этих алгоритмов. Эти основания имеют прямое отношение к вопросу о выборе алгоритма распознавания в каждом конкретном случае решения геологической или геофизической задачи. Для успешного решения задачи необходимо хорошо знать алгоритм распознавания, который используется. Из этого следует, что нельзя ожидать успеха, если геологи готовят информацию, а математики обрабатывают ее на машине.

Мы не будем останавливаться на толковании термина «образ» и его формальных определениях (в литературе эта тема неоднократно обсуждалась). Используемый иногда в тексте термин «распознавание образов» мы будем считать установившимся термином, нерасчленимым знаком определенной области исследований [2]. Мы не будем также давать формальную постановку задачи распознавания: таких постановок очень много и с ними можно при желании ознакомиться. Кроме того, в описании каждого алгоритма содержится полное описание и постановки задачи, и того, что данная программа понимает под понятием «образ».

§ 1. ПЕРСЕПТРОН

Персептрон — это устройство для распознавания образов, хотя автор персептрона вкладывал в этот термин гораздо более широкое (родовое) понятие: класс сетей из нейроноподобных элементов со случайными связями, моделирующих познавательные способности мозга.

Входным устройством персептрона является поле рецепторов, состоящее из большого количества фотосопротивлений (s -элементов) (рис. 1). Каждый из рецепторов может перейти в возбужденное состояние, если он попадает в освещенную часть изображения.

Все s -элементы (рецепторы) соединены с A -элементами (ассоциативными элементами). Число A -элементов такого же порядка, что и число s -элементов (в персептроне Розенблатта МАРК-1 s -элементов было 400, а A -элементов — 512). Каждый A -элемент соединен случайным образом с несколькими s -эле-

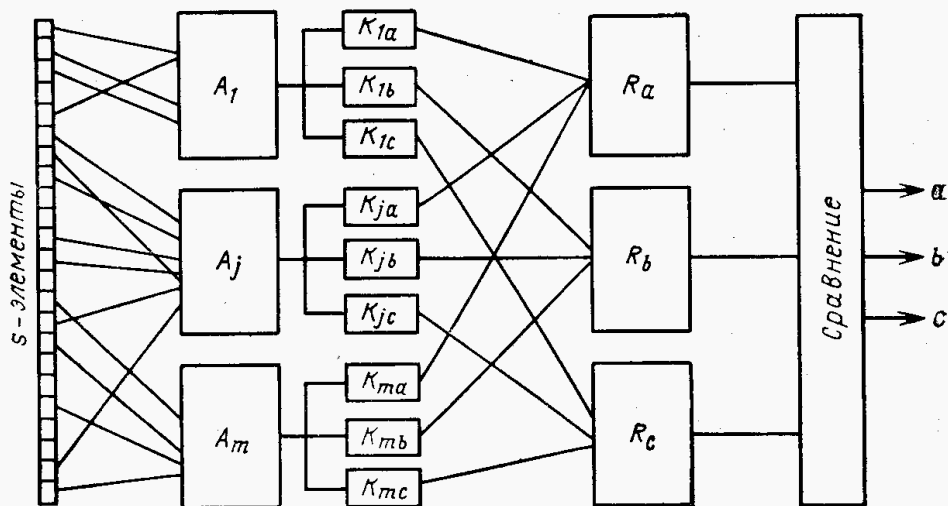


Рис. 1. Схема персептрона

ментами, и в дальнейшем эти связи не изменяются. Каждая из таких связей может быть возбуждающей или тормозящей. В первом случае при возбуждении s -элемента на вход A -элемента подается сигнал 1, во втором случае — 1. Если s -элемент не возбужден, то по связи передается сигнал 0.

Таким образом, когда на поле рецепторов проектируется картинка, на вход каждого A -элемента подается несколько сигналов, равных или 1, или —1, или 0. В A -элементе значения всех сигналов суммируются и сравниваются с постоянным для всех A -элементов порогом P . Если суммарный сигнал на входе A -элемента превосходит порог P , то A -элемент возбуждается и на выходе возникает сигнал, который через усилитель с коэффициентом усиления K посылается в решающее устройство R , которое суммирует все сигналы.

Обучение происходит следующим образом. После показа картинка из обучающей последовательности изменяют коэффициент усиления K_i тех усилителей, которые стоят на выходе возбужденных A -элементов. Если была показана картинка I класса, то коэффициент K_i увеличивают, если же была показана картинка II класса, то уменьшают. При этом на выходе усилителя могут изменяться величина и знак сигнала. После некоторого числа показов картинок из обоих классов проводят экзамен. Для этого проектируют новую картинку на поле рецепторов и выясняют знак сигнала на выходе решающего элемента R . Если сигнал больше нуля, то картинку относят к I классу, если меньше нуля, то ко II.

Чтобы понять возможности персептрона, рассмотрим его работу в предельно упрощенном случае. Пусть каждый A -элемент связан лишь с одним s -элементом возбуждающей связью, пусть порог срабатывания A -элемента $P=1$. В этом случае A -элемент просто повторяет реакцию этого s -элемента. Каков

3 2

Рис. 2. Наложение знаков

смысл образовавшихся к концу обучения коэффициентов K_i ? Модуль K_i показывает, насколько чаще встречалась черная точка в некотором месте растра в картинках одного класса, чем в картинках другого. Знак K_i показывает, в каком именно классе встречалась чаще эта точка. При экзамене персептрон проверяет, из каких точек состоит новая картинка. Если из таких, которые чаще входили в картинки I класса, то, значит, она и сама принадлежит I классу.

Если каждый A -элемент случайным образом соединить с двумя s -элементами возбуждающими связями, то в коэффициентах K_i будет отражаться информация о том, насколько чаще встречается указанная пара черных точек в одном классе картинок, чем в другом. В общем случае в K_i отражается информация о том, как часто встречается определенная комбинация черных и белых точек на растре в картинках различных классов. При снижении порога срабатывания A -элемента он будет реагировать на появление определенных сигналов хотя бы в части этих точек.

Теперь ясно, что персептрону доступны лишь те задачи, в которых картинки каждого класса имеют много общих фрагментов. Сходство для персептрона есть мера совпадения картинок при их наложении друг на друга. Поэтому цифра 3 на рис. 2 ближе для персептрона к одной из цифр 2, чем разные двойки между собой. Теперь понятно, почему для персептрона недоступны задачи по распознаванию изображений, расположенных в разных частях растра, или изображений разного масштаба, или повернутых на некоторый угол.

Таким образом, персептрон является не системой без наперед заданных признаков (как казалось его автору), а системой с очень жестким, бедным и неудачным для многих задач набором признаков. А указанная точка зрения возникла, вероятно, потому что часть операции формирования набора признаков определяется случайным процессом. Но после реализации случайного процесса персептрон становится системой со строго фиксированным набором признаков. И как бы этот процесс ни реализовался, среди доступных персептрону признаков нет признаков, нужных для многих часто встречающихся задач. Такова цена, которую приходится платить за отсутствие априорной организации.

§ 2. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

В 1962 г. появилась работа Э. М. Бравермана [3] с описанием алгоритма распознавания с помощью секущих плоскостей. Важнейшая особенность этой работы — введение в рассмотрение метрического пространства рецепторов. Простой пример

метрического пространства — плоскость с закрепленной декартовой системой координат. Каждой точке на плоскости ставится в соответствие пара чисел — координаты x, y , и, наоборот, каждой паре чисел соответствует одна точка на плоскости. На плоскости определено расстояние между точками $r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, где (x_1, y_1) и (x_2, y_2) — координаты соответствующих точек (следствие теоремы Пифагора). Тем самым задается метрика на плоскости. Пространства с заданной метрикой и называются метрическими. Всем известно трехмерное пространство, каждая точка которого определяется тремя числами (координатами x, y, z). Метрика в нем задается расстоянием

$$r = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}.$$

В математику введены в рассмотрение абстрактные математические конструкции — n -мерные пространства. Элементами этих пространств являются точки. Каждая точка определяется упорядоченным набором из n чисел — координатами $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. n -мерное пространство, в котором расстояние (метрика) задается по аналогии с трехмерным пространством фор-

мулой $r = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x'_i - x''_i)^2}$, называется евклидовым.

В пространстве рецепторов, которое ввел в рассмотрение Э. М. Браверман, каждое изображение, спроектированное на растр из n элементов, представлено точкой \bar{x} с координатами $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, являющимися значениями яркости изображения в фиксированных точках растра. Различным изображениям на растре соответствуют различные точки n -мерного пространства рецепторов. В случае рассмотрения только черно-белых изображений значения яркости принимают только два значения: 0 или 1. Соответственно в пространстве рецепторов такие изображения будут попадать только в дискретное множество точек, которое составляет множество вершин n -мерного куба. Если в пространстве рецепторов ввести евклидову метрику, то можно говорить о близости точек в этом пространстве, а тем самым возникает соблазн говорить о близости между изображениями, которые эти точки представляют.

В 1962 г. Э. М. Браверман [3] выдвинул гипотезу компактности: в пространстве рецепторов точки изображений, принадлежащие простому зрительному образу, лежат кучно (компактно), а кучи точек, соответствующие различным простым зрительным образам, лежат отдельно, не перемешиваясь. Таким образом, гипотеза компактности включает в себя и гипотезу делимости: кучи точек, принадлежащие различным классам простых изображений, могут быть отделены друг от друга.

Геометрическое представление задачи распознавания образов оказалось очень мощным инструментом и стимулировало множество новых алгоритмов и постановок задач. Причина этого в том, что описание задачи распознавания образов в геометрических терминах позволило использовать наше умение оперировать образами в трехмерном пространстве, т. е. пространственное воображение. Наше умение конкретно представлять себе кучи точек в трехмерном пространстве, разделяющие поверхности, расстояния между точками и т. п., переносилось на случай n -мерного пространства, и во многом такой перенос был оправдан. В результате были предложены различные алгоритмы распознавания образов, использующие геометрические представления. Все они базировались на предположении, что в пространстве рецепторов точки, представляющие изображения одного класса, занимают некоторую односвязную область пространства, не слишком вычурную по конфигурации границы. В методе секущих плоскостей [3] кучи точек, представлявших материал обучения различных классов, разделялись набором гиперплоскостей¹. В методе «обобщенного портрета» ищется единственная плоскость, разделявшая два класса. То же предположение (о возможности деления двух классов гиперплоскостью) лежит в основе алгоритма, основанного на «методе оврагов» [9]. Программа «Голотип» [11] основана на определении области существования каждого из классов с помощью покрытия гиперсферами. Метод потенциалов использует меру близости, сходную с функцией потенциала точечного электрического заряда в трехмерном пространстве. Число примеров можно было бы умножить.

Геометрическая интерпретация проблемы распознавания сделала довольно прозрачной связь между алгоритмами распознавания и задачами классифицирования геологических объектов по косвенным признакам.

§ 3. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Какие тенденции в развитии геологии предопределили интерес к использованию методов распознавания в начале 60-х годов? Во-первых, в связи с интенсивной добычей многих полезных ископаемых оказались исчерпанными месторождения, залегавшие на небольших глубинах и выходявшие частично на поверхность. При поиске более глубоко залегающих месторождений объект классифицирования оказывается недоступным прямому наблюдению и классифицирование приходится проводить, не имея непосредственных сведений о самом клас-

¹ Гиперплоскостью в n -мерном пространстве называют множество таких точек $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, координаты которых удовлетворяют уравнению $\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n = 0$. При $n=3$ — это обычная плоскость в трехмерном пространстве, при $n=2$ гиперплоскостью является прямая.

сифицирующем параметре, т. е. о содержании полезного ископаемого. Необходимость исследования более глубоких слоев Земли диктуется также потребностями общей геологии, которая исследует закономерности и историю развития земной коры. В этих условиях большую роль играют геофизические и геохимические методы исследования. Таким образом, в геологии существовал и существует весьма большой и важный круг задач, связанных с отнесением объектов к тому или иному классу по его косвенным характеристикам.

Во-вторых, относительная дешевизна геофизических и геохимических исследований (сравнительно с геологическими методами) стимулировала разработку и распространение разнообразных модификаций геофизических и геохимических методов исследования горных пород. Только в каротаже скважин за прошедшие полвека появились электрические методы (зондирование, микрозондирование, индукционный), газовый, магнитный, диэлектрический, акустический каротаж, ядерные методы (гамма-, нейтронный, нейтронный гамма-, гамма-гамма, серия нейтронных импульсных, методы наведенной активности), плазменный каротаж. Аналогичная ситуация наблюдается и в других областях геологической разведки. Последнее десятилетие отмечено широким распространением методов исследования из космоса. Все вместе они образуют все возрастающий поток информации, и с каждым годом доля извлекаемой информации падает.

Вследствие того что каждый из методов дает лишь косвенную информацию об искомым свойствах объекта (нефтеносности, пористости, или содержании меди), при интерпретации необходимо использовать одновременно несколько методов, взаимно дополняющих друг друга. Чтобы использовать данные различных исследований в рамках формального метода интерпретации, необходимо иметь модель объекта исследования и описывающие ее уравнения. Задача эта очень сложная, поскольку в подавляющем большинстве случаев объекты геологического исследования сложны по форме, составу и структуре. В результате модель интерпретации удается создать весьма редко, для очень простых ситуаций и описывает она связь между небольшим числом параметров (чаще всего между двумя-тремя параметрами).

Таким образом, наличие большого числа косвенных параметров объекта и необходимость их одновременного учета для извлечения максимально возможного количества информации требовали привлечения каких-то новых методов анализа данных. Одним из таких методов и оказался метод распознавания образов. Именно поэтому спустя только два года после появления первых распознающих программ начались первые работы по использованию распознающих программ в геологии.

Чем привлекательны программы распознавания образов при решении геологических задач?

1. Самая важная особенность программ распознавания с точки зрения классифицирования геологических объектов в том, что для построения классифицирующей функции (решающего правила) нет необходимости задавать явную модель объекта. Построение решающего правила может быть произведено в результате обучения на примерах, представляющих различные классы объектов (для простоты в дальнейшем мы будем говорить о двух классах).

2. Геологический объект очень естественно представляется набором своих характеристик, которые и являются координатами точки, представляющей данный объект в n -мерном пространстве геологических (и геофизических) характеристик:

$$A_i = (a_1^i, a_2^i, a_3^i, \dots, a_n^i).$$

3. Если в результате обучения на примерах удастся построить удовлетворительное решающее правило, то при его использовании для классифицирования каждого объекта будет действительно реализована комплексная интерпретация данных, так как положение каждой точки в n -мерном пространстве признаков определяется совокупностью всех признаков данного объекта. А это, в свою очередь, позволяет надеяться на то, что удастся правильно классифицировать объекты, которые при традиционных методах интерпретации не поддавались правильному классифицированию. Ведь стремление к комплексной интерпретации всегда было основано на гипотезе, что информация, которую можно извлечь из совокупности методов, превосходит информацию, которую мы извлекаем при интерпретации данных этих методов по отдельности (или группами). Таким образом, можно надеяться, что эффективность работы распознающих программ в геологических задачах может превзойти эффективность традиционных методов интерпретации.

4. Использование распознающих программ как некоей регулярной процедуры дает основание для постановки вопроса об информативности каждого из методов в рамках выбранного комплекса исследований и о выборе рационального (по какому-нибудь критерию) комплекса исследований. Проблема эта представляется весьма актуальной, поскольку непрерывно расширяется арсенал методов исследования геологических объектов.

Все эти соображения и побудили автора в 1962 г. начать работу по использованию программ распознавания образов в геологии (на примере задачи разделения нефтеносных и водоносных пластов по каротажным данным). Говоря о первых шагах по использованию программ распознавания образов в геологии и геофизике, нельзя не упомянуть тех, кто поддерживал это новое (и во многом спорное в то время) направление. Это были: А. И. Холин, заведующий Лабораторией ядерной

геофизики в Московском нефтяном институте им. И. М. Губкина (ныне МИНГ), который организовал в рамках этой лаборатории группу для работ по опробованию методов распознавания; В. В. Федынский, в то время член коллегии министерства геологии СССР, заведующий кафедрой геофизики МГУ; Я. И. Хургин, профессор математики МИНГа; М. М. Бонгард, замечательный ученый, автор первых работ по распознаванию образов в нашей стране, который с первого же знакомства с геологическим аспектом проблемы распознавания поверил в его перспективы.

Наряду с перечисленными соображениями, которые говорили в пользу использования распознающих программ в геологии и геофизике, были и серьезные сомнения.

1. Существует ли в пространстве имеющихся геологических и геофизических признаков поверхность, разделяющая объекты различных классов? А если она теоретически существует, то можно ли ее практически найти с помощью имеющихся программ распознавания? Ведь каждая из программ распознавания ищет решающее правило лишь в определенном классе функций.

2. Найдется ли достаточно материала для обучения? Ведь в задачах распознавания геометрических фигур такая проблема не стояла — количество картинок каждого класса (букв, треугольников, эллипсов) было практически неограниченным.

3. Смогут ли имеющиеся программы распознавания извлечь информацию, которая содержится в сочетаниях признаков? Ведь только в этом случае можно было надеяться на повышение эффективности интерпретации по сравнению с традиционными методами.

4. Удастся ли сочетать разумным образом в одном описании количественные и качественные характеристики объекта?

На все эти вопросы можно ответить только по результатам эксперимента. Работы по его реализации развивались стремительно. В 1963 г. М. Л. Извековой был подготовлен материал для задачи разделения нефтеносных и водоносных песчаников на Ромашкинском месторождении. В этом же году М. М. Бонгард провел эксперимент по обучению машины распознаванию нефтеносных и водоносных пластов с помощью программы «Кора-2». Эта программа была одним из блоков программы для распознавания геометрических фигур «Геометрия» [2]. Результаты были обнадеживающими, но эксперимент выявил ряд недостатков программы «Кора-2». М. М. Бонгард со своими сотрудниками из Института проблем передачи информации АН СССР М. Н. Вайнцвайгом и М. С. Смирновым создали новую программу «Кора-3». С ее помощью правильно было расклассифицировано на нефтеносные и водоносные 98 % пластов. Этот эксперимент подтвердил правильность исходных предпосылок и позволил перейти к основательному исследованию проблемы.

§ 4. ПРОБЛЕМА МЕТРИКИ В ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧАХ

При всей привлекательности аналогии между распознаванием изображений в n -мерном пространстве и геологической интерпретацией проблемы распознавания нельзя не признать и большого числа различий между ними.

При выборе евклидовой метрики все координатные оси признаются равноправными (по их вкладу в расстояние между точками). Это не могло вызвать возражений при распознавании изображений: в общем случае точки растра ничем не отличаются друг от друга. Однако при решении геологических задач пространство рецепторов образуется разнородными характеристиками: электрическим сопротивлением, радиоактивностью, возрастом, степенью метаморфизма и т. п. Как ответить на вопрос: «Что меньше — 1 Ом·м или 1 см?». Значения одних характеристик меняются в 2 раза, других — в 10 раз, третьих — в 1000 раз. Можно привести все оси примерно к одному диапазону единиц, если выразить все показания в нормированных единицах $(x - \bar{x})/\sigma$, где x — значение характеристики в данном объекте, \bar{x} — среднее значение этой характеристики на множестве всех объектов, σ — среднее квадратическое отклонение. Но проблема соотношения различных осей этим не снимается.

Таким образом, такая естественная мера, как евклидова, является довольно искусственной в пространстве геологических и геофизических параметров. Впрочем, как и любая другая (пока у нас нет способа выбора адекватной метрики). Если, например, задаться метрикой $r = \max \{ |x'_i - x''_i| \}$, то кругом на плоскости (т. е. множеством точек, удовлетворяющих условию $r \leq R$) будет квадрат (рис. 3). При этом алгоритмы, которые основаны на покрытии какой-либо области сферами, будут покрывать теперь эту область кубами, однако вряд ли эффективность распознавания при этом существенно изменится.

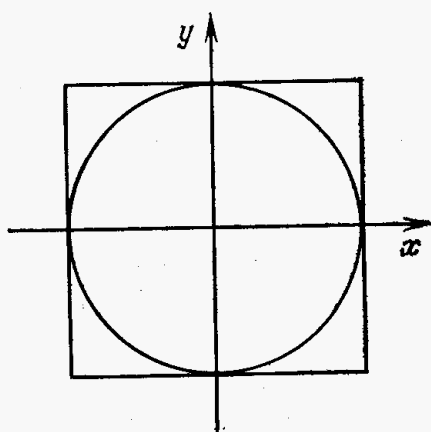


Рис. 3. Круг в различной метрике

Лучше всего, если бы удалось так определить расстояние между точками пространства характеристик, чтобы все объекты одного класса оказались близкими между собой, объекты другого класса — тоже близкими, а расстояние между объектами различных классов было бы велико (т. е. чтобы выполнялись гипотезы компактности и разделимости). При распознавании изображений необходимо еще, чтобы такое положение имело бы место для всех интересующих нас задач,

которые можно сформулировать на заданном растре. Ведь все картинки отображаются в одно и то же пространство рецепторов. К сожалению, разные задачи предъявляют разные требования к понятию «близость точек». В одних задачах нужно, чтобы близкими считались объекты, почти совпадающие при наложении, в других — чтобы близкими оказались два объекта, полученные друг из друга путем переноса или поворота. Третьи задачи требуют, чтобы близкими в пространстве рецепторов считались подобные фигуры. При этом возникают и противоречивые требования. Например, требование близости между собой всех окружностей и удаленности их от всех треугольников (независимо от размера) придет в противоречие с требованием близости всех маленьких фигур (независимо от формы) и удаленности их от всех больших фигур.

В геологических задачах распознавания ситуация в корне отлична. В распознавании изображений пространство рецепторов фиксировано, но мы обладаем возможностью конструировать знаки (например, шрифт или дорожные знаки) так, чтобы их легко различать. В геологии ситуация в некоторой степени обратная: мы не можем (или почти не можем) конструировать объекты распознавания (ибо они выбираются из экономических или научных соображений), но зато в широких пределах можем изменять пространство характеристик. Поэтому при выборе одной и той же метрики мы, по существу, в разных пространствах получим близость различного содержания. В одном случае это может быть близость пород по электрическому сопротивлению (полезная при разделении нефтеносных и водоносных пластов по данным каротажа), в другом — близость объектов по положению относительно геологических структур (что бывает полезно при определении рудоносности).

Более того, характеристики геологических объектов отбирались именно с позиций их эффективного классифицирования в различных практических задачах (в первую очередь в задачах разведки полезных ископаемых), т. е. значения характеристик должны были отличаться у объектов, принадлежащих различным классам. Значение электрического сопротивления велико в нефтеносных пластах и мало в водоносных (при прочих равных условиях), сильные землетрясения чаще возникают на разломах высокого ранга, чем на разломах низкого ранга и т. д. Таким образом, пространство характеристик складывается в процессе отбора наиболее информативных характеристик. В частном случае, если объекты делимы хотя бы по одной характеристике, то они делимы и во всем пространстве. Конечно, фактическая степень делимости, которая достигается в различных геологических задачах, различна, и все новые геологические, геохимические и геофизические методы направлены на увеличение этой делимости в тех или иных задачах.

Итак, можно сказать, что гипотеза делимости образов в пространстве рецепторов гораздо лучше соответствует задачам

геологического распознавания, чем задачам распознавания зрительных изображений.

§ 5. СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Геометрическая интерпретация задачи распознавания позволила легко сформулировать задачу обучения распознаванию на примерах как задачу проверки статистических гипотез. При статистическом подходе задача ставится следующим образом. Имеется множество объектов, принадлежащих двум классам. Каждый объект описывается n характеристиками.

В n -мерном пространстве характеристик, описывающих эти объекты, заданы две функции распределения вероятностей — $P_1\vec{x}$ и $P_2\vec{x}$, где \vec{x} — n -мерный вектор. Первая из них задает вероятность появления объекта из I класса. Вторая задает распределение вероятностей для объектов II класса. Необходимо указать правило, минимизирующее общее число ошибок при отнесении объекта с параметрами $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$ к I или II классу (в более общем случае минимизирующее суммарный риск $R = c_1\alpha_1 + c_2\alpha_2$, где α_1 и α_2 — вероятности ошибок при классификации объектов I и II классов, c_1 и c_2 — соответственно цены ошибок в этих классах).

В математической статистике разработаны методы решения этой задачи для ряда частных случаев, которая решается в два этапа. На первом этапе необходимо определить функции распределения вероятностей P_1 и P_2 по имеющейся выборке объектов каждого класса (этот процесс соответствует обучению). После того как получены величины P_1 и P_2 , определяют границы областей, принадлежащих каждому из классов¹. Классификацию объектов производят в зависимости от того, в какую из областей попадает соответствующая объекту точка с координатами $(z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)$.

Трудности, стоящие на пути такого решения задачи, очевидны.

Во-первых, нужно помнить, что статистические методы не позволяют на основе эмпирического материала определить вид функции распределения. Математическая статистика позволяет лишь определить, какова вероятность того, что имеющийся эмпирический материал порожден тем или иным теоретическим законом распределения. Лишь в случае, когда тип функции распределения известен, существующие методы дают возможность оценить наилучшим образом параметры этого распределения. В реальных задачах распознавания тип функции распределения нельзя предсказать из общих соображений и это затрудняет их решение методами математической статистики.

¹ Известно, что правило решения будет в байесовском смысле оптимальным, если (в случае деления на два класса) области будут определены в соответствии со знаком функции $\ln[P_1(\vec{x})/P_2(\vec{x})]$ (при $c_1 = c_2$).

Во-вторых, трудности усугубляются небольшим объемом имеющихся эмпирических данных. Обычно число объектов, по которым необходимо восстановить функции распределения $P_1(\vec{x})$ и $P_2(\vec{x})$ (объем выборки), весьма мал. Несколько десятков точек, которыми приходится обходиться в задачах распознавания в 10-, 20-мерном пространстве, — это очень и очень мало. В результате оценка параметров (для принятого типа распределения) оказывается малодостоверной.

В-третьих, при таком ограниченном материале невозможно получить представительную выборку.

В результате воздействия всех этих причин полученная функция может оказаться весьма далекой от истинной, а это приведет к большим ошибкам в распознавании новых объектов¹.

Сравнение статистического и геометрического подхода к задачам узнавания позволяет полнее уяснить особенности каждого из методов. В случае, когда предполагается нормальное распределение плотности вероятности для каждого из двух классов, разделяющей поверхностью является гиперплоскость, так же как в эвристических алгоритмах «обобщенного портрета» или метода оврагов. Однако положение разделяющей плоскости в них определяется существенно разными факторами. В эвристических алгоритмах распознавания образов положение плоскости определяется стремлением минимизировать число ошибок *данной конкретной выборки* для обучения. На положение плоскости оказывают влияние точки из граничной области между классами.

В статистических методах положение разделяющей плоскости определяется из условия минимизации числа ошибок *во всей совокупности выборок*, порождаемых нормальным распределением объектов каждого класса. Таким образом, эвристические методы нахождения разделяющей поверхности почти всегда (с точностью до вероятности нахождения наилучшей разделяющей плоскости) обеспечивают меньшее число ошибок на материале обучения, чем статистические. На положение разделяющей гиперплоскости, которая ищется методами математической статистики, оказывают влияние в равной мере все точки данного класса, представленные в материале обучения: и те, что лежат в граничной области, и те, которые лежат вдали от нее.

Последнее свойство статистического метода распознавания образов часто имеет неприятные последствия. Например, пусть объекты обоих классов порождены нормальными распределениями (на рис. 4, а изображены одномерные распределения). В этой ситуации статистический и эвристический методы дадут близкие решения (вблизи порога Δ). Если же II класс окажется суммой двух нормальных распределений (см. рис. 4, б), то эвристический метод даст то же решение, а статистический сместит

¹ Вместе с тем ясно, что в тех случаях, когда вид функции распределения заранее известен, статистические методы дадут наилучший результат.

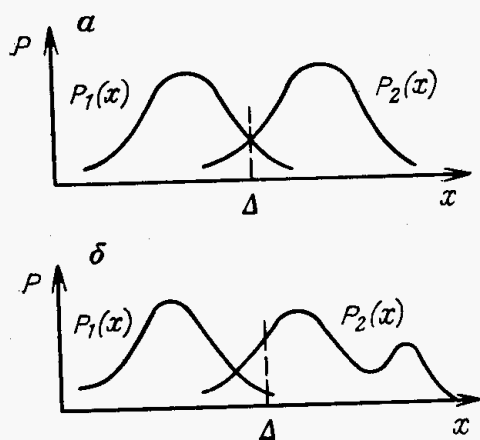


Рис. 4. Выбор порога между классами объектов

статистических исследований. Поведение на «хвостах» распределений одновременно и наиболее важно и наименее регулярно. Изменения на «хвостах», вызываемые сильнодействующими факторами, появляются лишь в малой доле наблюдений, а значит, они и трудно обнаруживаются в выборке. Тем не менее они весьма важны, поскольку далекие «хвосты» распределения индивидуальных значений могут дать весомый вклад во многие статистики (в том числе среднее и дисперсию). Фактические «хвосты» редко согласуются с основной частью распределения и, вероятно, плохо состыкуются с ней [36]. Это наблюдение опытного статистика В. Феллера имеет непосредственное отношение к построению решающего правила статистическими методами.

Можно рассмотреть эту проблему и с другой, информационной, точки зрения. Решение задачи распознавания статистическими методами дает огромное количество информации о классах (о вероятности появления объекта с любым набором характеристик). На основе этой информации решается и частный вопрос о том, какая из вероятностей больше в данной точке пространства, т. е. вопрос о знаке функции $\ln[P_1(\vec{x})/P_2(\vec{x})]$.

В результате работы эвристических алгоритмов мы получаем гораздо более бедную информацию — лишь о границах областей различных классов [в терминах статистических методов лишь о функции $\text{sign}\{\ln[P_1(\vec{x})/P_2(\vec{x})]\}$]. И то и другое решающее правило основывается на одном и том же материале обучения, на одной и той же информации. Ясно, что более бедное решение [функция $\text{sign}\{\ln[P_1(\vec{x})/P_2(\vec{x})]\}$] может быть получено с большей точностью.

Статистические методы распознавания внесли свой вклад в формирование языка и методов распознавания. Формулировка

среднее значение и дисперсию для II класса и в результате сместится порог распознавания Δ , а вместе с ним возрастет и число ошибок распознавания.

На практике очень часто принимается предположение о нормальности распределения, но очень редко оно выполняется достаточно строго. Поэтому большое внимание специалистов привлекает проблема обнаружения отклонений от нормального распределения.

Анализ распределений в «центре» и на «хвостах» требует пристального внимания во всех ста-

проверяемых гипотез, представительность выборки, цена ошибок 1 и 2-го родов, оптимальное байесовское решающее правило, независимость характеристик — это принципы и понятия, которые составляют в настоящее время неотъемлемую часть проблемы распознавания. В дальнейшем мы еще вернемся к сравнению статистических и других методов распознавания.

§ 6. МЕТОД «ОВРАГОВ» В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ

Алгоритм распознавания, основанный на методе «оврагов», представляет собой наиболее прямое осуществление идеи разделимости объектов в пространстве характеристик. Алгоритм направлен прямо на поиск поверхности, разделяющей материал обучения с наименьшим числом ошибок.

В геометрической трактовке задач распознавания процесс обучения машины заключается в построении $(n-1)$ -мерной поверхности $f(\vec{x}) = 0$ наилучшим (в некотором смысле) образом разделяющей точки I и II классов. Эту задачу можно свести к задаче на отыскание экстремума функционала $K[f(\vec{x})]$ в пространстве параметров, определяющих разделяющую поверхность.

Поиск экстремума функций, заданных в многомерном пространстве, представляет собой весьма сложную задачу. Нами был использован предложенный И. М. Гельфандом нелокальный метод поиска минимума функций многих переменных — метод «оврагов» [9].

В задаче распознавания в качестве функционала $K[f(\vec{x})]$, который требуется минимизировать для того, чтобы правильно разделить объекты из обучения, был выбран функционал вида

$$K[f(\vec{x})] = \sum_i F_i,$$

а в качестве разделяющей поверхности — гиперплоскость. Функция F_i называется функцией штрафа i -го объекта. Например, можно положить $F_i = -1$, если гиперплоскость $f(\vec{x}) = 0$ правильно его классифицирует, и $F_i = 1$, если он распознается ошибочно. Такая функция изображена на рис. 5 как функция расстояния r от гиперплоскости $f(\vec{x}) = 0$. В этом случае минимизация функционала $K[f(\vec{x})]$ есть минимизация числа ошибок на материале обучения.

Необходимо отметить, что работа алгоритма происходит в двух пространствах. Одно пространство — n -мерное пространство характеристик объектов. В нем заданы объекты (точки) I и II классов, представляющие материал обучения. В этом пространстве мы ищем гиперплоскость, разделяющую материал обучения с наименьшим числом ошибок.

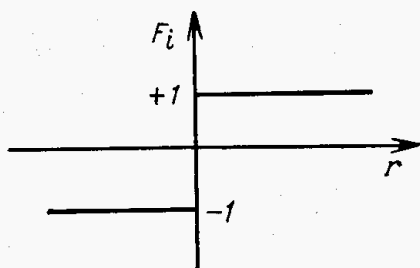


Рис. 5. Функция штрафа F_i

Гиперплоскость задается уравнением $\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n = 0$. Поиск этой гиперплоскости ведется в другом пространстве — $(n+1)$ -мерном пространстве параметров гиперплоскости с осями $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n$. Каждой точке этого $(n+1)$ -мерного пространства $\vec{a} = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_n)$ соответствует гиперплоскость в n -мерном пространстве характеристик:

$$f(\vec{x}) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n = 0.$$

Для каждой точки пространства параметров \vec{a} можно вычислить значение функционала $K(\vec{a}) = K[f(\vec{x}) = 0] = \sum F_i$. Этот функционал вычисляется в пространстве характеристик и зависит как от гиперплоскости \vec{a} , так и от материала обучения.

Однако удобнее задавать функцию штрафа $F(r)$ следующим образом. Для точек, классифицируемых плоскостью, правильно

$$F(r) = -1 \text{ при } r \leq -c; \quad F(r) = -r/c \text{ при } 0 > r > -c,$$

где $c = \text{const}$.

Для точек, классифицируемых плоскостью, ошибочно

$$F(r) = 1 \text{ при } r \geq c; \quad F(r) = r/c \text{ при } 0 \leq r < c.$$

График $F(r)$ представлен на рис. 6. Выбранная функция штрафа $F(r)$ определяет следующие свойства алгоритма. Вклад каждого объекта в функцию штрафа зависит от его расстояния от разделяющей плоскости. На расстояниях, меньших c , при движении точки в сторону своего класса функция штрафа непрерывно падает. Если точки удалены от разделяющей плоскости больше, чем на c , то все они дают одинаковый вклад в функцию штрафа вне зависимости от своего фактического положения.

Минимизация функционала $K[f(\vec{x})]$ ведет к перемещению разделяющей гиперплоскости в таком направлении, чтобы новое положение ее обеспечивало уменьшение числа ошибок на материале обучения или по меньшей мере приближение ошибочно распознанных точек к разделяющей плоскости и удаление правильно распознанных точек от разделяющей плоскости.

Метод «оврагов» состоит в следующем. Алгоритм приводит к построению последовательности точек спуска A_0, A_1, \dots, A_m . Предположим, что точки A_0, A_1, \dots, A_n найдены. Для нахождения следующей точки A_{n+1} производится так называемый шаг по

Рис. 6. Модернизированная функция штрафа

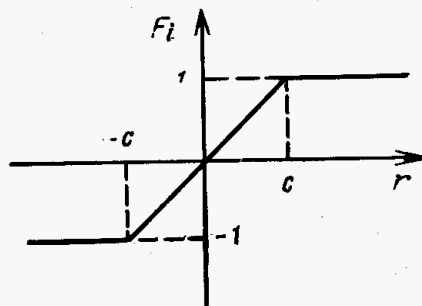
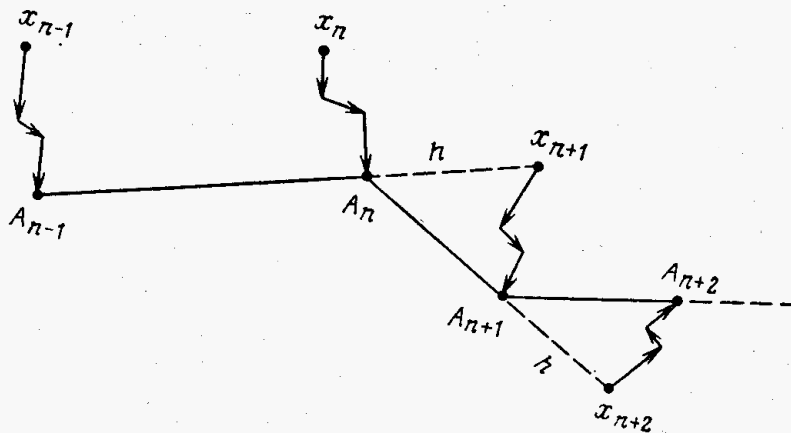


Рис. 7. Схема поиска методом «оврагов»



оврагу. Через точки A_{n-1} и A_n проводится прямая, на которой на расстоянии овражного шага h от A_n находится точка x_{n+1} , называемая точкой отхода. Из точки x_{n+1} производится спуск по какому-нибудь локальному методу поиска. Спуск продолжается до тех пор, пока величина $1 - (\Delta F/F)$ будет меньше некоторой заранее заданной величины Δ , называемой градиентной пробой. В результате спуска на $\Delta = \Delta F/F$ мы получаем очередную точку A_{n+1} , после чего процесс повторяется (рис. 7).

Величины h и Δ являются важными характеристиками минимизируемой функции. От их правильного выбора в значительной степени зависит успех поиска. Овражный шаг выбирается значительно больше градиентного спуска и в большей мере предопределяет качество поиска. При правильно выбранном значении овражного шага поиск становится более эффективным за счет адаптации направления поиска к направлению оврага. По мере продвижения по оврагу его направление уточняется и длины градиентных спусков становятся много меньше длины овражного шага.

В описанном алгоритме с особой отчетливостью выявилось одно предположение, которое неявно используется во многих алгоритмах. Оно является некоторым смягчением гипотезы разделимости. Гипотеза разделимости утверждает, что существует достаточно гладкая поверхность, разделяющая в пространстве характеристик объекты двух различных классов. Предположение

использованное в данном алгоритме, утверждает существование такой полосы (слоя, пограничной зоны, переходной области), ограниченной двумя гладкими поверхностями (в простейшем случае — двумя параллельными гиперплоскостями), что: 1) по каждую сторону от этой полосы располагаются объекты только одного класса, 2) доля объектов (от общего числа), лежащих внутри этой полосы, не слишком велика, 3) ширина этой полосы не может быть уменьшена.

§ 7. АЛГОРИТМ «КОРА-3»

Алгоритм «Кора-3» занимает особое место в истории развития методов распознавания образов в геологии. Во-первых, это была первая программа распознавания, использованная для решения геологической задачи. Во-вторых, это самая долгоживущая программа: прошло уже 25 лет со времени ее создания, однако она до сих пор используется для решения задач распознавания. В-третьих, она получила международное признание. В-четвертых, она обросла большим количеством модификаций, позволяющих использовать ее в разнообразных ситуациях.

Программа «Кора-3» относится к программам логического типа. Она оперирует логическими высказываниями типа «если... — то».

В программе «Кора-3» объекты представляются в виде n -рядных двоичных кодов. Каждый разряд кода соответствует определенному логическому высказыванию о свойстве объекта. Если объектом является пласт, охарактеризованный геофизическими данными, то, например, i -й разряд соответствует высказыванию: «значение кажущегося удельного электрического сопротивления пласта на зонде 0,45 м не менее 15 Ом·м; j -й разряд соответствует высказыванию: «мощность пласта находится в интервале от 3 до 4 м» и т. д. Если соответствующее высказывание оказывается истинным, то в данный разряд заносится 1, если высказывание ложно — то 0. Таким образом, если мощность пласта равна 3,5 м, то в j -й разряд заносится 1. Если же мощность пласта равна 5,0 м, то в этот разряд занесется 0.

В программе ищутся признаки, характеризующие каждый из двух классов. Каждый признак представляет собой определенного рода логическую функцию (конъюнкцию) трех каких-либо высказываний об объекте, входящих в его описание. Например, признаком нефтеносности пласта может оказаться следующее высказывание: «кажущееся удельное электрическое сопротивление пласта, измеренное зондом 2,25 м, более 10 Ом·м, при этом мощность пласта менее 1 м, а относительная интенсивность естественного гамма-излучения менее 0,2». На языке машины это высказывание будет выражено, например, следующим образом: в третьем разряде кода стоит 1, в 11-м разряде — 0, а в 34-м разряде — 1.

По какому правилу машина отбирает признаки, которые мо-

гут оказаться полезными при делении объектов двух различных классов?

В машину одновременно вводятся все объекты для обучения, т. е. все соответствующие коды. Они образуют две матрицы: матрицу объектов I класса и матрицу объектов II класса. Строками матриц являются коды объектов, а столбцами — значения определенной характеристики для всех объектов из обучения. Первый этап работы программы — обучение.

1. Выбираются три столбца матрицы — i , j и K -й. Рассматривается определенная комбинация нулей и единиц в этих столбцах, например в i -м столбце (т. е. в i -м разряде) 1, в j -м столбце 0, в K -м столбце 1. Проверяется, в скольких объектах I и II классов в соответствующих столбцах (i , j и K -м) имеется именно такое сочетание нулей и единиц — «1,0,1». Если окажется, что такое сочетание нулей и единиц встретилось k раз или более в кодах одного класса и ни одного раза в кодах противоположного класса, то этот набор нулей и единиц в рассматриваемых разрядах называется признаком. Те объекты, которые имеют в рассматриваемых столбцах именно этот набор нулей и единиц, называются охарактеризованными этим признаком. Очевидно, что каждый признак характеризует только объекты одного класса. Соответственно хранятся они в памяти отдельно.

Признаки A и B называются эквивалентными, если они характеризуют одни и те же объекты. Признак A считается сильнее признака B , если признак A характеризует все пласты, которые характеризует признак B и еще хотя бы один.

2. Обнаруженный признак сравнивается со всеми признаками, уже записанными в памяти. Если он оказывается сильнее одного или нескольких признаков, лежащих в памяти, то эти более слабые признаки вычеркиваются из памяти, а в память записывается новый признак. Если какой-нибудь ранее записанный признак сильнее нового, то новый признак не записывается. Если не выполняется ни одно из этих соотношений, то новый признак записывается на свободное место (если оно есть).

3. Проверяются все сочетания столбцов по три описанным выше способом (таких сочетаний будет всего C_n^3) и все комбинации нулей и единиц в выбранной тройке столбцов (таких комбинаций восемь: 0, 0, 0; 0, 0, 1; 0, 1, 0; ...; 1, 1, 1). Всего просматривается $8C_n^3$ «кандидатов в признаки».

Второй этап работы программы — доучивание. Число признаков, характеризующих данный объект, будет в дальнейшем называться числом голосов, собранных данным объектом. После окончания алгоритма обучения каждый объект оказывается охарактеризованным некоторым числом признаков (или некоторым числом голосов). В дальнейшем объекты, которые набирают менее чем \tilde{K} голосов, будут считаться отстающими.

Доучивание — этап программы, к которому машина переходит не автоматически, а по команде человека. При этом уста-

навливаются определенные \tilde{K} (порог отстающих) и новые K .

При доучивании повторяется алгоритм обучения при следующих ограничениях: признак, отобранный программой, должен характеризовать не менее K отстающих пластов (а не K любых пластов из одного класса, как это требовалось на первом этапе). Таким образом, отбираются дополнительные признаки.

Если отобранные признаки заполнили память, то обучение заканчивается. Если же нет, то можно провести новый этап доучивания (установив новые \tilde{K} и K) или остановиться на достигнутом.

При распознавании новых объектов программа подсчитывает, сколько признаков I класса и сколько признаков II класса «голосуют» за данный объект. Решение о принадлежности к тому или другому классу можно принимать, например, по большинству голосов.

В чем особенности принципов распознавания образов, реализованных в программе «Кора-3»? Мы уже видели, что конструкторы распознающих программ типа «персептрон» исходили из имитации принципов работы мозга на нейронном уровне. А конструкторы геометрических программ распознавания отказались от принципа имитации. Программа «Кора-3» возвращается к этому принципу (но уже не на нейронном уровне, а на логическом), пытаясь моделировать логику процесса распознавания.

Другая важная особенность «Коры-3» — это идея преобразования исходного пространства характеристик (пространства рецепторов) в другое пространство — пространство полезных признаков (полезных в данной задаче).

Однако эта особенность «Коры-3» оказалась малосущественной в геологических (и других прикладных) задачах. Дело в том, что при распознавании черно-белых изображений пространство рецепторов одно и то же для всех задач, и поэтому задачей распознающей программы является преобразование этого пространства в пространство признаков, полезных в данной задаче. В геологических задачах распознавания аналогичную работу делает специалист (геолог или геофизик), подбирая описания объектов, адекватные задаче (на это указывал М. М. Бонгард [2]). В силу этой особенности программы, созданные позднее для решения задач распознавания изображений на базе «Коры-3», смогли решать задачи, недоступные программам, основанным на геометрических принципах, в то время как оба типа программ решают технические задачи распознавания (геологические, медицинские и др.) примерно с равной эффективностью.

Наконец, отметим одну особенность программы «Кора-3». В работе [21] было показано, что по эффективности программа «Кора-3» не превосходит другие программы (потенциальные функции, обобщенный портрет, голотип и некоторые др.). Од-

нако большое значение для геологов имеет содержательная трактовка решающего правила. Это психологически очень оправданно, особенно если распознающая программа ошибается на данном материале реже, чем геолог. Человек не желает просто принять, что программа делает меньше ошибок. Человек хочет знать «Почему?». И это не праздное любопытство. Недоверие к программе можно преодолеть лишь тогда, когда понятны основания для ее суждений.

Этот вопрос оказался для «искусственного интеллекта» гораздо более серьезным, чем можно было предположить ранее. Вначале казалось, что для моделирования интеллекта на ЭВМ необходимо в первую очередь умение моделировать научное, строго логическое мышление, в котором главную ценность представляет получение истинных утверждений. Однако в процессе работы над этой проблемой (в первую очередь на примере программ, доказывающих теоремы, или в более общем случае программ логического вывода) оказалось, что получение истинных утверждений в прикладных задачах оказывается недостаточным для «интеллектуального» поведения. Иными словами, такие программы не выдерживают теста Тьюринга вот в каком месте: они не могут объяснить резонансы своих замечательных (в прагматическом плане) решений.

Более того, это трудно (а часто невозможно) сделать специалисту, опираясь на известное решающее правило распознающей программы. Действительно, как перевести на язык знакомых нам моделей решение, выраженное линейной функцией $\alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n = 0$ или любой другой функцией от n характеристик?

В последнее время эта проблема стала все яснее осознаваться учеными. В результате возникли проекты программ, при составлении которых не столько заботятся об истинности их суждений, сколько об их обоснованности (при том, что обоснования объективно бывают и ложными, но убедительными для данного индивидуума в данном контексте).

С указанных позиций программа «Кора-3» имеет несомненные преимущества. Решающее правило, получаемое этой программой, состоит из коротких конъюнкций (не более чем от трех переменных). Каждая такая конъюнкция доступна (хотя бы в принципе) интерпретации с помощью имеющихся в геологии и геофизике моделей (которые, как правило, имеют два-три параметра). Но и это не спасает программу «Кора-3» (наряду с другими) от недоверия геологов и геофизиков.

Итак, мы рассмотрели несколько типов распознающих программ. Уже на первых шагах использования алгоритмов распознавания встал вопрос: какую выбирать программу в каждой конкретной задаче? Эта проблема обсуждается до сих пор, ибо формальных рецептов так и не найдено. Однако можно перечислить ряд неформальных соображений, которые необходимо принимать во внимание.

1. В алгоритмах распознавания заложены некоторые общие представления о характере различия между классами. Например, если в качестве решающего правила выбирается гиперплоскость, то это предполагает в статистических терминах монотонную связь между любой характеристикой объекта и отноше-

нием правдоподобия $P_1(\bar{x})/P_2(\bar{x})$: чем дальше мы уходим от разделяющей гиперплоскости, тем меньше (или больше) отношение правдоподобия. Для геометрического подхода к распознаванию, когда не вводятся распределения вероятностей, это означает, что изменением одной только характеристики можно перевести объект из одного класса в другой. Такая ситуация имеет место, например, в задаче разделения нефтеносных и водоносных пластов по каротажным данным. Чем выше кажущееся удельное электрическое сопротивление пласта-коллектора, тем выше (при прочих равных условиях) его нефтенасыщенность; чем выше пористость пласта (при неизменном удельном электрическом сопротивлении), тем выше нефтенасыщенность и т. д.

Программа «Кора-3» не обладает этим свойством. При изменении характеристики в некоторых пределах это вообще не влияет на описание объекта. При сильном изменении характеристики двоичный код описания изменится: 1 перейдет в другой разряд. Однако этот разряд может не входить ни в одну из конъюнкций, составляющих решающее правило, и данная характеристика перестанет участвовать в распознавании объекта. Таким образом, в программе «Кора-3» работают лишь интервалы значений этих характеристик.

2. В различных программах распознавания отражено разное представление о классах объектов. Если сравнить, например, программу «Голотип» и «обобщенный портрет» (или любую другую, строящую разделяющую гиперплоскость), то можно отметить следующее. Программа «Голотип» рассчитана на построение сложной области, принадлежащей одному из классов. Она может состоять из областей, между которыми лежат области, принадлежащие другому классу (или не принадлежащие ни одному из классов). Иначе говоря, небольшие изменения характеристик существенны при классификации, класс составлен из некоторого числа подклассов (однородных внутри себя). При использовании разделяющей гиперплоскости мы принимаем гипотезу о «грубом» строении каждого класса, об отсутствии неоднородности внутри класса. Такие предположения могут оказаться вынужденными в том случае, когда характеристики измеряются с большими погрешностями (вне зависимости от модели класса).

3. Каждая программа распознавания есть инструмент исследования строения классов в пространстве характеристик. Метод потенциальных функций отвечает на вопрос, расположены ли точки кучно. Алгоритм разделяющей гиперплоскости говорит о том, разделяются ли классы плоскостью. Программа «Голотип» выявляет «гнездовое» строение классов (аналогично методу

потенциальных функций). Поэтому может оказаться полезным использовать не один метод распознавания, а несколько и на этом основании формировать представление о конфигурации исходного материала в пространстве характеристик.

Здесь уместно сделать одно важное замечание. Хотя геометрическая интерпретация задачи распознавания и дает очень мощный инструмент для исследования и решения проблем распознавания, но этот способ мышления таит в себе и некоторые коварные заблуждения. И связаны они в первую очередь с высокой размерностью пространства характеристик. Дело в том, что ряд очевидных свойств трехмерного пространства сильно изменяется при увеличении размерности пространства. Мы непрерывно оперируем понятием «куч» точек в пространстве характеристик. Однако вот какова реальность. Материал одной из задач составлял 70 объектов, принадлежащих двум классам. По сложности это была рядовая задача: с помощью гиперплоскости материал делился на два класса при ошибке 15 %. Каждый был описан 11 параметрами. По всем характеристикам это обычная задача. Неожиданным оказался следующий результат: 67 из 70 объектов лежат в пространстве характеристик так, что каждый из них может быть отделен от всех остальных с помощью гиперплоскости. Иными словами, в этом множестве почти нет внутренних точек. Грубо можно себе представить, что эти 67 точек лежат на поверхности сферы. Вообще говоря, такой результат можно было предвидеть. Пусть объекты в пространстве характеристик заполняют равномерно некоторый шар. Известно, что в трехмерном пространстве в поверхностном слое шара толщиной 0,1 радиуса сосредоточено приблизительно 30 % его объема. При возрастании размерности этот процент непрерывно растет. Таким образом, при высокой размерности пространства большинство точек, разбросанных равномерно по шару, окажется в поверхностном слое шара.

Таковы некоторые неформальные аспекты выбора программы распознавания для решения конкретной задачи. Ясно, что такой неформальный анализ требует не только формального знания того или иного алгоритма, но и понимания самих принципов его построения.

Глава II

НЕФОРМАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ РАБОТ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ НЕФТЕНОСНЫХ ПЛАСТОВ

В процессе решения задачи распознавания можно выделить следующие этапы: 1) содержательная постановка задачи, 2) выбор объектов распознавания, 3) описание объектов распознавания, 4) сбор и подготовка данных, 5) выбор материала обучения, 6) счет (выбор алгоритма распознавания и параметров алгоритма), 7) выбор информативных параметров, 8) интерпретация

результатов. Относительно этих этапов необходимо сказать следующее.

Во-первых, они не выполняются последовательно и независимо друг от друга. Наоборот, многие этапы существенно связаны (причем в разных задачах по-разному). Выбор объекта, например, определяет во многом способ его описания (геологическое тело описывается часто средними характеристиками и положением относительно других тел; геологический разлом — телами, которые он разделяет; точка на местности — значениями различных полей в этой точке). При построении описания объекта может выясниться, что не удастся построить адекватного описания, и это может свидетельствовать о неудачном выборе объекта. В процессе сбора данных может обнаружиться, что нет информации по некоторым характеристикам объекта, и это потребует изменения описания. При формировании материала обучения может оказаться, что недостаточно имеющегося числа объектов какого-либо класса или какого-либо типа. После счета по программе распознавания некоторые объекты, которые попадают в ошибки, требуют уточнения их принадлежности к классу и т. д.

Во-вторых, процесс решения задачи распознавания есть, по существу, итеративная процедура: после получения первого решения приходится иногда все переделывать заново (заново ставить задачу, формировать обучение, выбирать пространство признаков и т. п.).

Мы не будем последовательно рассматривать каждый из этапов на конкретных примерах из различных геологических и геофизических задач распознавания. Дело в том, что для понимания любого этапа работ необходимо хорошо понимать всю задачу в целом и принимать во внимание решения, принятые на других этапах. Поэтому разумнее рассмотреть примеры решения нескольких задач и при их описании выделить те или иные из перечисленных выше этапов.

§ 1. ЗАДАЧА РАЗДЕЛЕНИЯ НЕФТЕНОСНЫХ И ВОДОНОСНЫХ ПЕСЧАНИКОВ ПО ДАННЫМ КАРОТАЖА

Обработка данных каротажа скважин весьма удобный объект автоматизации: все данные поступают на каротажную станцию в виде электрического сигнала и, следовательно, допускают запись на магнитный носитель (в аналоговой или цифровой форме). В пределах больших регионов используется стандартный комплекс измерений. Этим комплексом исследуют большое число скважин, обеспечивая массовость материала. В задачу обработки данных каротажа входят расчленение разреза, качественная интерпретация выделенных пластов (определение литологии, выделение коллекторов и оценка насыщения), количественная оценка параметров пласта (коэффициентов пори-

стости, глинистости, нефтенасыщенности), корреляция разрезов скважин. В дальнейшем рассмотрим задачи расчленения и корреляции разрезов, а сейчас обратимся к задаче качественной интерпретации пластов-коллекторов с целью разделения их на нефтеносные и водоносные с помощью программ распознавания.

Задача разделения нефтеносных и водоносных пластов по комплексу геофизических параметров, измеренных в скважине, — первая геологическая задача, которая решалась с помощью программ распознавания. Выбор именно этой задачи в значительной мере определялся объективными причинами. Во-первых, геофизики весьма ясно и обоснованно осознали необходимость совместной интерпретации большого числа параметров, измеряемых в скважине, для выделения в разрезе продуктивных пластов и можно было ожидать, что такая интерпретация принесет успех. Во-вторых, в этой задаче имелась возможность использовать для обучения и экзамена десятки и сотни объектов. В-третьих, ввиду того что в каждом районе существует обязательный и постоянный комплекс исследований, проводимый во всех скважинах, можно было составить однотипное описание всех объектов. В-четвертых, имелась возможность сопоставить эффективность заключений, выданных программой, с заключениями геофизиков, зафиксированными в специальных документах по каждой скважине.

Перед интерпретатором, обрабатывающим материалы промысловой геофизики по отдельной скважине, в основном встают следующие задачи: проверка качества материала и привязка различных кривых по глубинам (задачи предварительной обработки), выделение интервалов разреза, однородных по физическим параметрам (пластов), определение литологии этих пластов, выделение пластов-коллекторов и определение объектов для испытания с целью получения притоков нефти и газа (собственно геологические задачи). Именно последние из перечисленных задач являются задачами распознавания.

Для примера рассмотрим задачу разделения нефтеносных и водоносных пластов в песчано-глинистом разрезе.

Выбор объекта. Прежде всего необходимо определить объект распознавания. Пусть объектом распознавания будет отдельный пласт, выделяемый в разрезе скважины интерпретатором по геофизическим данным как коллектор. Считая, что каждый пласт однороден по физическим свойствам (во всяком случае по тем, которые отражаются на геофизических параметрах, регистрируемых в скважинах), он может быть описан набором значений геофизических параметров, зарегистрированных против данного пласта: a_1, a_2, \dots, a_n . Задача состоит в том, чтобы по набору этих параметров определить, является пласт нефтеносным или водоносным.

Даже при такой самой общей постановке задачи возникают вопросы, которые необходимо обсудить.

1. В связи с тем что выбор объектов для интерпретации производится человеком, эти объекты могут не удовлетворять определению, которое дано было выше. Например, вследствие ошибочной отбивки границ пласта объект окажется существенно неоднородным.

2. Требуется уточнить, что мы понимаем под термином «нефтеносный» пласт (или «водоносный» пласт). Обычно в промысловой геофизике ставится задача определения характера насыщенности пласта, точнее, коэффициента нефтенасыщенности пласта K_n . Однако метод определения величины K_n разрабатывается на керне, а насколько правомерно переносить этот метод в условия скважины, до сих пор неясно. Ведь достаточного количества данных о нефтенасыщенности пластов нет и проверить достоверность полученных результатов нельзя. Однако в практике оперативной интерпретации данных каротажа обычно не требуется определять коэффициент нефтенасыщенности пласта; необходимо лишь указать, что будет отдавать пласт после перфорации — нефть или воду. Эффективность такого заключения может быть объективно оценена по результатам опробования (с некоторыми оговорками).

Следовательно, можно обучить программу различать пласты, которые после перфорации отдают нефть, от пластов, отдающих воду¹. В дальнейшем термин «нефтеносный» или «водоносный» пласт будет употребляться именно в этом смысле. Конечно, при такой постановке задачи существенным оказывается методика вскрытия пласта. С одной стороны, такая обусловленность нежелательна, так как в некоторых случаях характер извлекаемой из пласта жидкости может быть различным при разных методах вскрытия. С другой же стороны, нас на практике интересует результат перфорации именно при имеющемся методе опробования, а методы опробования остаются неизменными долгое время.

3. При такой постановке задачи из рассмотрения исключаются случаи, когда пласт не является коллектором, т. е. когда он при испытании не отдает ни нефти, ни воды. Тем самым мы предполагаем, что машине для интерпретации будут предъявлены только пласты-коллекторы. Но коллекторы также выделяются с ошибками. Этот факт нужно учитывать при использовании программ распознавания.

Рассмотрим пример решения такой задачи на Ромашкинском месторождении (ТатАССР), где указанные трудности сведены к минимуму. В качестве объекта распознавания выбраны пласты песчаников и алевролитов девонского возраста, к которым приурочено нефтяное месторождение. Интерпретация промыслово-геофизических данных в этих отложениях не представляет трудностей: границы пластов отбиваются довольно

¹ Мы пока не будем рассматривать случай, когда пласт отдает нефть с водой, так как такие случаи встречаются сравнительно редко.

четко, коллекторы выделяются весьма уверенно, качество геофизических материалов хорошее.

Описание объекта. Выбор параметров для решения задачи разделения нефтеносных и водоносных пластов производится исходя из информационной модели задачи и из имеющегося набора параметров, измеряемых в скважине. Под информационной моделью задач промысловой геофизики понимается в данном случае совокупность зависимостей (установленных или постулируемых) между свойствами, характеризующими продуктивность пласта (нефтенасыщенность, пористость, проницаемость), физическими характеристиками породы (плотность, пористость, удельная электропроводность, мембранные потенциалы, емкость поглощения, удельная радиоактивность и др.), геофизическими характеристиками, измеряемыми в скважине, и условиями измерений (диаметр скважины, удельное сопротивление промывочной жидкости, диаметр зоны проникновения раствора в пласт и т. д.). К настоящему времени информационные модели многих задач промысловой геофизики довольно хорошо разработаны и в этом одно из важных достижений промысловой геофизики. Модели эти имеют в основном качественный характер, т. е. они указывают, связаны ли два параметра монотонной зависимостью (например, электропроводность увеличивается с ростом пористости) или зависимость эта имеет экстремум (например, зависимость интенсивности захватного гамма-излучения от пористости проходит через максимум).

Для задачи разделения нефтеносных и водоносных пластов считается установленной следующая модель. Изменение соотношения объемов нефти и минерализованной воды в поровом пространстве породы существенно сказывается на следующих параметрах, которые в настоящее время могут быть измерены в скважине: 1) электрические характеристики породы (кажущееся удельное электрическое сопротивление и диэлектрическая постоянная); 2) радиоактивные характеристики (сечение поглощения тепловых нейтронов, спектр захватного излучения). Особенностью радиоактивных методов исследования пластов является их малая глубинность. В условиях необсаженной скважины, пробуренной с применением раствора на водной основе, как правило, имеется проникновение фильтрата промывочной жидкости в пласт и нефть в значительной мере оказывается оттесненной от скважины. Поэтому использование нейтронных методов для разделения нефтеносных и водоносных пластов оказывается неэффективным.

Гораздо более благоприятная ситуация возникает при бурении скважин с применением растворов на нефтяной основе. В этом случае зона проникновения фильтрата промывочной жидкости оказывается минимальной и эффективность всех методов исследования пластов резко возрастает. Пока,

к сожалению, такая технология бурения скважин остается мало-распространенной.

В такой ситуации разделять пласты на нефтеносные и водоносные можно лишь по удельному электрическому сопротивлению пластов и их диэлектрической проницаемости. В настоящее время в промысловой геофизике применяются методы, основанные на измерении электрического сопротивления пласта, — метод кажущихся сопротивлений с помощью зондов различной длины (от нескольких сантиметров до нескольких метров), боковой каротаж, индукционный каротаж. Начинает все шире применяться диэлектрический каротаж. Однако показания любого из этих методов не дают истинной характеристики породы (например, удельного сопротивления), так как эти показания зависят еще и от диаметра скважины, сопротивления промывочной жидкости, диаметра зоны проникновения, мощности пласта, сопротивления вмещающих пород и т. п. В ряде случаев от этого явления можно избавиться (например, с помощью бокового каротажного зондирования), но, как правило, этого сделать не удается. В дальнейшем изложении в основном будут использоваться традиционные методы каротажа — боковое каротажное зондирование, метод спонтанной поляризации, нейтронный и гамма-каротаж. Однако ясно, что методы распознавания позволяют использовать любые данные.

Определение удельного сопротивления породы еще не решает вопроса о ее нефтенасыщенности, так как удельное сопротивление породы зависит не только от нефтенасыщенности, но и от пористости, глинистости, структуры порового пространства. Увеличение пористости приводит к снижению удельного сопротивления породы, увеличение цементации — к возрастанию удельного сопротивления, наличие трещин снижает удельное сопротивление и т. д.

Итак, чтобы поставленная задача решалась более достоверно, необходимо кроме удельного электрического сопротивления пласта учитывать и его пористость, глинистость и т. п. Информация об этих характеристиках пласта содержится в показаниях нейтронного гамма-каротажа, гамма-каротажа, метода самопроизвольной поляризации.

Таким образом, анализ информационной модели задачи позволяет указать три группы параметров, которые должны составить исходное пространство параметров: 1) параметры, отражающие удельное электрическое сопротивление пласта (кажущиеся удельные сопротивления на зондах различной длины, составляющих комплект БКЗ, показания микрозондов, данные бокового и индукционного каротажа); 2) параметры, отражающие коллекторские свойства пласта (показания НГК, ГК, ПС, АК); 3) параметры, отражающие условия измерения (диаметр скважины, удельное сопротивление промывочной жидкости, мощность пласта, удельное сопротивление вмещающих пород).

Для описания девонских пластов песчаников и алевролитов Ромашкинского месторождения были выбраны следующие параметры.

1. Кажущееся удельное сопротивление ρ_k , зарегистрированное стандартным потенциал-зондом (размер зонда $AM=0,75$ м).

2. Кажущиеся удельные сопротивления ρ_k , зарегистрированные градиент-зондами размерами: а) $AO=4,25$; б) $AO=2,25$ м; в) $AO=0,45$ м.

3. Удельное сопротивление промывочной жидкости ρ_c .

4. Мощность пласта h .

5. Номинальный диаметр скважин d_0 .

6. Относительная амплитуда потенциалов собственной поляризации пород $\Delta U_{сп}/U_{сп}^{max}$.

7. Характеристика вышележащей пачки пород по сопротивлению.

8. Наличие или отсутствие эффекта экранирования на кривой 4-метрового градиент-зонда.

9. Показания нейтронного гамма-метода

$$\eta_{n\gamma} = (J_{n\gamma} - J_{min}) / (J_{max} - J_{min}).$$

10. Показания метода естественной гамма-активности

$$\eta_{\gamma} = (J_{\gamma} - J_{min}) / (J_{max} - J_{min}).$$

Из значений перечисленных выше 12 параметров составляется входной вектор для каждого пласта. Этот вектор и был объектом распознавания. Выбор размерности входного вектора — ответственная задача. С одной стороны, желательно использовать как можно больше имеющейся информации (в надежде получить наиболее эффективное решающее правило). С другой стороны, возможности извлечения информации ограничены объемом обучающей выборки — чем меньше число объектов в обучении, тем меньше число параметров можно использовать в описании объектов. При заданном объеме материала обучения увеличение размерности описания ведет к уменьшению ошибок лишь до определенной поры. Далее число ошибок начинает возрастать, т. е. новые параметры добавляют лишь «шум». Необходимо отметить, что «шум» — понятие относительное. Те же самые параметры в составе того же комплекса методов могут оказаться существенно информативными при увеличении объема обучения.

Существуют оценки для определения оптимального соотношения числа объектов в обучении и размерности описания объектов, однако они получены для весьма идеализированных ситуаций: нормальное распределение объектов внутри класса и независимость параметров. Последнее предположение особенно существенно. Ведь обычно геологические и геофизические описания объекта весьма коррелированы. Более того, сама постановка задачи распознавания геологических объектов опирается

на то, что параметры описания объектов зависимы и эту зависимость можно использовать для повышения надежности классификации.

Кодирование. Каждая программа распознавания требует своего способа представления данных в машине (своего кодирования). Кроме того, сами исходные данные обладают различной природой: одни из них являются числовыми величинами (в нашей задаче — значения кажущихся сопротивлений, амплитуды ПС и т. д.), другие — логическими величинами (например, наличие экранирования). Поскольку в каждой программе все данные должны быть представлены однотипно (или в числовой форме, или в логической), то всегда встает вопрос о том, что предпочтительнее: выражать логические переменные L_j в числовой форме (вместо « L_j — истинно» или « L_j — ложно» использовать выражение $L_j=0$ или $L_j=1$) или числовые переменные R_i в логической форме, например в виде предиката $P (R_i > \alpha)$, где $\alpha = \text{const}$. В первом случае мы должны будем оперировать не имеющими физического смысла величинами (например, средним значением L_j); во втором — огрубляем исходные данные и теряем информацию.

Выбор того или иного способа кодирования накладывает ряд ограничений на выбор и использование программ распознавания. Остановившись на числовом описании объектов, мы получаем широкие возможности в вычислении различных функционалов, весьма полезных при оценке решающего правила с учетом априорной информации, однако такие решающие правила затрудняют объяснение решения, т. е. построение моделей разделяемых классов.

Обычно программы распознавания имеют ограничения на размерность вектора описания объектов или на общее число двоичных разрядов, что также необходимо учитывать при кодировании параметров. При использовании программы распознавания «Кора-3» данные необходимо представить в логической форме. Значения порогов кодирования для различных параметров даны в табл. 1. Интервалы, на которые разбиты показания зондов, выбирались из следующих соображений.

Необходимо разбить более подробно интервал значений кажущихся сопротивлений, встречающихся как в нефтеносных, так и в водоносных пластах, т. е. зону перекрытия кривых распределения, так как значения кажущихся сопротивлений, лежащие вне перекрытия, свидетельствуют о нефтеносности (или водоносности) пласта вне зависимости от их конкретных значений. С этой целью по имеющемуся материалу были построены кривые распределений кажущихся сопротивлений для всех зондов и из их анализа установлены границы зон перекрытия (рис. 8). Остановимся подробнее на выборе границ квантования для крайних интервалов. Желательно, чтобы в эти интервалы попадало не только много нефтеносных объектов (в интервал от α_1 до ∞) или много водоносных (в интервал от 0

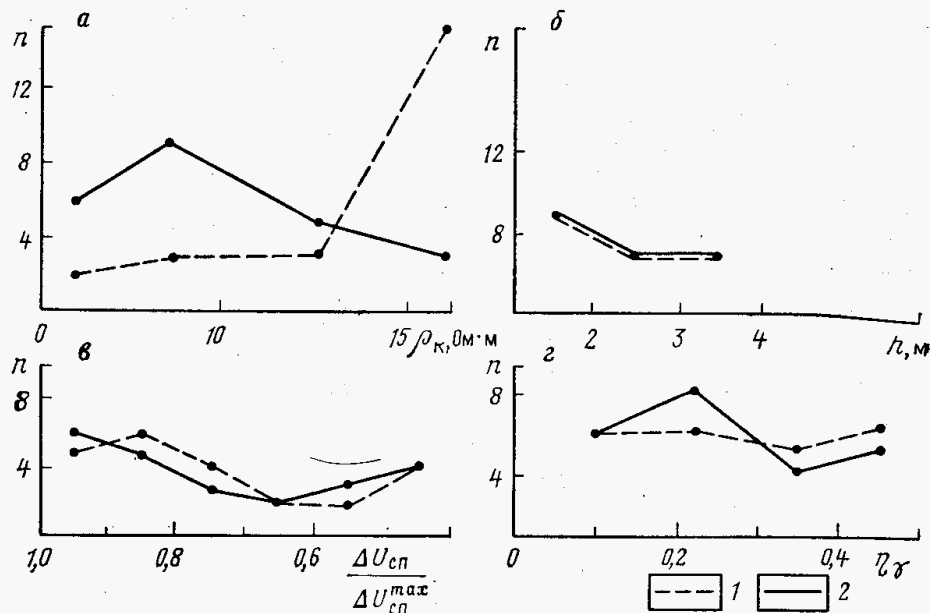


Рис. 8. Распределение значений параметров на Ромашкинском месторождении.
1 — нефтеносные пласты, 2 — водоносные пласты

до α_2), но и небольшое число объектов (2—3) другого класса. Если в этих интервалах отсутствуют объекты другого класса, то попадание параметра в этот интервал является «чистым» признаком, однако только на материале обучения. На новом материале, вероятно, найдутся противоречащие примеры, и это может привести к некоторому ухудшению результата распознавания.

Если же порог будет отодвинут так, что в интервал попадут 2—3 объекта противоположного класса, то программа «Кора-3» вынуждена будет для формирования полезного признака взять комбинацию этого признака с каким-нибудь другим, который будет с ним по необходимости коррелирован, ибо должен по меньшей мере встретиться в тех же K объектах материала обучения. Такая пара коррелированных признаков оказывается более устойчивой для распознавания, чем одиночный признак.

При разбиении показаний метода потенциалов собственной поляризации ($\Delta U_{\text{сп}}/\Delta U_{\text{сп}}^{\text{max}}$), нейтронного гамма-метода и гамма-метода ширины интервалов выбираются таким образом, чтобы погрешность регистрации этих параметров была соизмерима с выбранной шириной интервалов.

Вместе с тем число интервалов, на которое разбиваются значения каждого параметра, не должно быть велико, ибо в этом случае в каждый интервал будет попадать очень мало объектов и информативность его будет мала. В программе «Кора-3», например, число единиц в разряде должно быть не меньше K (порог отбора признаков) для того, чтобы это значение параметра могло попасть в решающее правило.

При разбиении значений сопротивлений промывочной жидкости ширины интервала разбиения выбиралась таким образом, чтобы измерения величины ρ_c внутри каждого интервала не приводили бы к значительным изменениям кажущихся сопротивлений, т. е. чтобы при измерении ρ_c внутри интервала кажущиеся сопротивления оставались бы в тех же интервалах или в крайнем случае переходили в соседний интервал.

Удельное сопротивление промывочной жидкости ρ_c определялось или по данным БКЗ, или по резистивиметру. При анализе всего материала выяснилось, что при принятом разбиении значений ρ_c на интервалы расхождения этих величин, определенных по данным БКЗ и резистивиметру, укладываются в интервалы разбиения. Поэтому при машинной интерпретации во входном векторе можно использовать ρ_c , определенное по резистивиметру. С учетом выбранных интервалов разбиения для каждого пласта составляется входной вектор. Расположение параметров в нем приведено в табл. 1.

Кодирование каждого пласта проводилось двумя способами. Первый способ (обычный): если показания метода попадают в какой-либо интервал (α_i, α_{i+1}) , то в разряде, соответствующем этому интервалу, ставится единица; во всех остальных интервалах, относящихся к этому же параметру, — нули. Второй способ: в данный разряд (интервал) заносится единица при выполнении условия $x \geq \alpha_i$, а в случае $x < \alpha_i$ — нуль. Этот метод кодирования назван «ступенькой».

При обычном способе кодировки значениями кажущихся сопротивлений ($AO = 4,25$ м) были заняты пять разрядов, соответствующих интервалам $0 < \rho_k \leq 2$ Ом·м; $2 < \rho_k \leq 4$; $4 < \rho_k \leq 7$; $7 < \rho_k \leq 10$ и от 10 до ∞ . Согласно этому разбиению, при кодировании «ступенькой» единица (нуль) в соответствующем разряде означает попадание (непопадание) значений ρ_k в интервалы $0 - 2$; $0 - 4$; $0 - 10$; $0 - \infty$. При этом способе кодирования в последнем разряде всегда будет стоять единица и этот разряд будет лишним. Таким образом, в каждом параметре, закодированном «ступенькой», высвобождается один разряд. Так как с помощью «ступеньки» были закодированы восемь параметров, то это привело к высвобождению восьми разрядов, а следовательно, и к сокращению времени работы программы¹. Способ кодирования «ступенькой» в данной задаче оказался полезным и по другим соображениям.

1. Кажущиеся удельные сопротивления зависят от нефтенасыщенности пласта (при прочих равных условиях) монотонно.

2. Значения параметров, характеризующих условия измерения сопротивлений пластов в скважине (диаметр скважины,

¹ В процессе обучения по программе «Кора-3» основное время работы машины уходит на просмотр всех сочетаний из n разрядов по три (n — число разрядов во входном векторе), всего $C_n^3 = n(n-1)(n-2)/3! \approx n^3$, т. е. время работы машины пропорционально кубу числа разрядов входного вектора.

сопротивление промывочной жидкости), связаны с кажущимися сопротивлениями также монотонно.

3. Связи коллекторских свойств пласта с его удельным сопротивлением, с одной стороны, и с геофизическими параметрами, отражающими эти свойства (I_{γ} , $I_{\eta\gamma}$, $\Delta U_{\text{СП}}$), с другой — также являются монотонными.

Из этих соображений можно сделать следующий вывод. Если при неизменности всех остальных характеристик сопротивление пласта возрастает, то возрастает вероятность того, что пласт нефтеносен. Поэтому, если, например, признаком нефтеносности является высказывание: «мощность пласта h равна 2 м, относительная амплитуда $\Delta U_{\text{ПС}} = 0,9$; $\rho_{\text{К}} = 10$ Ом·м», то высказывание: « $h = 2$ м, $\Delta U_{\text{СП}} / \Delta U_{\text{СП}}^{\text{max}} = 0,9$, $\rho_{\text{К}} > 10$ Ом·м» также будет признаком нефтеносности. Это показывает допустимость такого рода кодирования в рассматриваемой задаче. Более того, очевидна большая естественность такого рода признаков в этой задаче.

Таким образом, выбором метода кодирования мы вносим в закодированный материал дополнительную информацию (о монотонности связи между параметрами), что должно привести к повышению эффективности работы программы в данной задаче.

Наконец, нужно отметить, что применение способа кодирования «ступенькой» оказывается особенно полезным при небольшом объеме обучения. Ведь при кодировании не «ступенькой» каждый признак, отобранный программой «Кора-3», характеризует лишь небольшую область пространства параметров (многомерный прямоугольник), и для того, чтобы покрыть все пространство этими признаками, необходимо большое их число, а для того, чтобы они отобрались, необходимо в каждой такой области иметь K точек или более (т. е. K пластов или более), где K — порог отбора признаков. При кодировании же «ступенькой» каждый признак характеризует гораздо большую часть пространства (целый октант), пространство может быть покрыто меньшим числом признаков и сформировать их можно при меньшем числе пластов в обучении.

Итак, параметры $\rho_{\text{К}}$, $\rho_{\text{С}}$, d , $\Delta U_{\text{СП}} / \Delta U_{\text{СП}}^{\text{max}}$, η_{γ} , $\eta_{\eta\gamma}$ разумно кодировать способом «ступенькой». Только мощность пласта (до 4 м) не имеет смысла кодировать этим способом, поскольку зависимость показаний градиент-зондов от мощности пласта не является монотонной функцией. При колебаниях мощности пластов от 1 до 4 м эта зависимость будет монотонной для градиент-зондов размером 4,25 и 0,25 м (в случае, когда мощность пласта или строго больше, или строго меньше длины зонда), а для градиент-зонда размером 2,25 не будет монотонной.

Эксперимент, проведенный для выяснения преимущества способа кодирования «ступенькой», показал, что эффективность решения задачи при этом возрастает.

Выбор объектов для обучения. Чтобы добиться высокой эффективности распознавания и оценить эту эффективность, необходимо провести и обучение, и распознавание на достоверном материале. Поэтому в работе использовались материалы по пластам, для которых имелись достоверные результаты опробований, или (при отсутствии опробований) геолого-геофизические заключения, не вызывающие сомнений. Если при опробовании пласта получали нефть, то пласт принимался за нефтеносный; при получении воды и при отсутствии подозрений на затрубную циркуляцию — за водоносный. Пласт, по которому не было результатов опробования, относили к нефтеносному или к водоносному, если он был расположен заведомо выше или ниже водонефтяного контакта (для Ромашкинского месторождения это вполне надежный критерий).

В различных задачах в материале обучения участвовало от 10 до 45 объектов каждого класса, а при таком небольшом числе объектов в обучении возможны довольно сильные отклонения распределений параметров данной выборки от распределений генеральной совокупности. Поэтому выбору материала для обучения уделялось особое внимание.

Пласты для обучения отбирались исходя из следующих соображений.

1. Не должно быть разрядов, в которых для всех векторов, входящих в обучение, стоит один и тот же знак (1 или 0), так как это означает, что данный разряд не несет информации о разделении пластов.

2. Во входной вектор наряду с параметрами, отражающими характер насыщения пласта, входят параметры, сами по себе не несущие никакой информации о нефтенасыщенности или водонасыщенности пласта: сопротивление промывочной жидкости ρ_c , диаметр скважины d_c , интенсивность естественного гамма-излучения и др. Если бы обучение было представлено достаточно большой и представительной выборкой, то распределения этих параметров были бы одинаковыми для нефтеносных и водоносных пластов. Поскольку обучение проводилось по небольшому числу пластов, то вполне вероятны резкие отклонения в распределении параметров на материале обучения от предельных распределений. Например, может оказаться, что нефтеносным пластам в общем соответствуют большие значения диаметров скважин, чем водоносным. В соответствии с этим программа воспримет повышение диаметра скважины как указание на возможную нефтеносность пласта, т. е. программа выявит ложный признак («предрассудок»). Чтобы избежать образования «предрассудков», материал в обучении необходимо подбирать таким образом, чтобы распределения нефтеносных и водоносных пластов по параметрам, которые не несут информации о нефтенасыщении пласта, были примерно одинаковыми.

3. Так как основную массу девонских пластов представляют пласты, довольно легко интерпретируемые, то при случайном

подборе материала для обучения в нем оказалось бы большинство легко интерпретируемых пластов и в дальнейшем программа хорошо узнавала бы довольно легкие пласты и плохо интерпретировала бы сложные. Поэтому в обучении сложные для интерпретации пласты должны занимать значительное место, большее, чем то, которое они занимают в общем объеме материала, подлежащего интерпретации. С этой целью в обучение вводились пласты, по которым геофизики дали заключения, противоречащие результатам испытаний. Это соответствует тому, что в материале обучения нефтеносные пласты с низкими значениями кажущихся удельных сопротивлений и водоносные пласты с высокими значениями кажущихся сопротивлений встречаются чаще, чем в материале, подлежащем распознаванию.

Обучение и экзамен. В обучение вошли 23 пласта каждого класса мощностью $h \leq 4$ м. Для экзамена было отобрано 100 пластов. Кривые распределения значений параметров для нефтеносных и водоносных пластов (по материалу обучения) приведены на рис. 8. При работе с программой «Кора-3» процесс обучения проходит следующим образом.

На первом этапе обучение ведется по всем пластам, отобранным для обучения. Значение параметра K (минимальное число объектов, в которых встречается признак) устанавливается на первом этапе из следующих соображений. Величина K не может быть больше, чем число пластов в обучении в каждом классе. С другой стороны, если K выбрать малым, то уже на первом этапе отберется много признаков, память окажется целиком (или почти целиком) заполненной и нельзя будет провести доучивание. Поэтому величина K устанавливается такой, чтобы отобралось около 10 признаков (естественно, что это делается подбором). Опыт показывает, что довольно часто начальное значение K примерно равно половине числа объектов в одном классе.

После того как проведен первый этап обучения, отобрано какое-то число признаков и проведен экзамен на пластах из обучения, необходимо выделить отстающие пласты, по которым будет проходить доучивание. После первого этапа обучения в отстающих оставляют примерно половину пластов. На каждом последующем этапе доучивания число отстающих пластов сокращают. Соответственно величина K на каждом этапе также уменьшается, причем так, чтобы оставаться в 2—3 раза меньше, чем число отстающих пластов.

При отборе признаков желательно, чтобы число признаков различных классов было примерно одинаковым. Регулировать равномерность отбора признаков можно, устанавливая для каждого класса свое отношение между числами отстающих и значением K : если желательно, чтобы на следующем этапе поменьше отобралось признаков данного класса, то число отстающих в данном классе нужно установить поменьше.

В рассматриваемой задаче наилучшие результаты были получены при следующем процессе обучения.

На первом этапе обучения была выбрана величина $K=10$. При доучивании постепенно снижали величину K . При $K=2$ было получено наименьшее число ошибок. Результаты распознавания 100 пластов ($h \leq 4$ м) на этом этапе оказались следующими. Были сделаны две ошибки: одна ошибка в нефтеносном пласте и одна ошибка в водоносном.

Затем было проведено обучение по 45 нефтеносным и 45 водоносным пластам всех мощностей (по 23 пласта мощностью не более 4 м и по 22 пласта мощностью свыше 4 м). В результате обучения было отобрано 44 нефтеносных и 40 водоносных признаков. При экзамене 270 пластов большой и малой мощности по этим признакам машина сделала три ошибки (в пластах мощностью не более 4 м ошибки приходится на те же два пласта).

Признаки, отобранные в результате работы программы, приведены в табл. 2. Построение такой таблицы ничем не отличается от построения таблиц, в которых записаны пласты в закодированной форме. Однако в каждой строке этой таблицы записан не пласт, а один из признаков. Вначале записаны признаки нефтеносности пластов, а затем признаки водоносности. Например, первый нефтеносный признак: в 10-м разряде 0, в 20-м разряде 1 и в 41-м разряде 1.

Используя такую таблицу, довольно легко проэкзаменовать пласт вручную без помощи машины. Для этого нужно экзаменуемый пласт записать в виде двоичного кода, приложить этот код к первому признаку в табл. 2 и определить, совпадают ли в соответствующих разрядах знаки в коде и в признаке. Затем проверяют таким же способом второй признак и т. д. После проверки всех признаков подсчитывают, каких признаков — нефтеносных или водоносных — оказалось больше в данном пласте.

Возможность интерпретации геофизических данных вручную с помощью критериев, выработанных машиной, означает, что нет необходимости иметь во всех группах по интерпретации вычислительные машины (или организовывать соответствующую связь с машиной). Обучение на соответствующем материале может быть проведено там, где машина имеется, а выработанные машиной признаки могут быть переданы интерпретаторам для повседневного пользования.

Поскольку машинная интерпретация основывается на использовании только геофизических данных, геологу предоставляется возможность, имея результаты интерпретации геофизических данных, вынести окончательное решение о продуктивности пласта, привлекая все имеющиеся геологические сведения.

Итак, рассмотрев задачу разделения нефтеносных и водоносных пластов в песчаниках, мы обнаружили следующие особенности на различных этапах решения этой задачи.

1. На этапах выделения объектов, описания объектов, проверки эффективности решающего правила не встретилось особых затруднений.

2. Этапы кодирования материала и выбора материала для обучения потребовали неформального анализа, учитывающего как существо задачи, так и особенности метода обработки данных.

§ 2. ВЫДЕЛЕНИЕ НЕФТЕНОСНЫХ ПЛАСТОВ В КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРАХ

Эффективность геофизических заключений по карбонатным коллекторам обычно ниже, чем по песчаникам, а в некоторых случаях интерпретаторы вообще отказываются выдавать заключения о продуктивности карбонатных пластов по данным промысловой геофизики. Трудности интерпретации геофизических данных по карбонатным коллекторам имеют вполне реальную причину. Известно, что структура порового пространства в известняках может быть гораздо сложнее, чем в песчаниках за счет трещин и каверн. Это приводит к тому, что на удельное электрическое сопротивление пластов часто структура порового пространства оказывает большее влияние, чем сопротивление насыщающего пласт флюида. Кроме того, зона проникновения становится весьма сложной, неоднородной по электрическим свойствам и глубокой. В этих условиях извлечь из каротажных кривых информацию о характере насыщения пласта становится особенно трудным.

В такой ситуации использование программ распознавания представляло большой интерес, так как позволяло выяснить, содержится ли в существующем комплексе измерений достаточно информации о продуктивности пластов и были ли неудачи наши связаны с тем, что мы использовали слабые методы обработки информации. Рассмотрим вначале относительно легкую задачу интерпретации карбонатных коллекторов с гранулярным типом пористости в турнейских известняках Красноярского месторождения Оренбургской области.

Гранулярные известняки. При сравнении данных опробования скважин и интерпретации геофизиков в турнейских отложениях Красноярского месторождения выявлены два несовпадения. В шести случаях интерпретация была неоднозначной — пласты охарактеризованы как возможно нефтеносные. Еще в одном случае пласт описан как, по-видимому, водоносный.

Комплекс геофизических параметров, выбранный для разделения пластов-коллекторов на нефтеносные и водоносные, характеризовался двумя особенностями. Во-первых, в комплексе отсутствовали показания гамма-метода. Это вызвано тем, что в пределах турнея показания гамма-метода в каждой скважине постоянны. Во-вторых, в комплекс включена информация о времени τ , прошедшем между вскрытием пласта и моментом реги-

страции геофизических кривых. Известно, что со временем физические характеристики прискважинной зоны изменяются (в связи с процессом проникновения фильтрата промывочной жидкости в пласт), поэтому, желая получить максимально эффективное решение задачи, было решено ввести во входной вектор и эту информацию. Кодирование данных было проведено способом «ступенькой» (по соображениям, изложенным выше при интерпретации пластов песчаников).

По результатам обучения машины по 22 нефтеносным и 23 водоносным пластам было проведено распознавание 56 нефтеносных и 41 водоносных пластов. В экзамен были включены 10 пластов из турнейских отложений соседней с Красноярской площадью Заглядинской. Наилучший результат был получен на 4-м этапе обучения ($K=3$).

В скв. 80 (Заглядинская структура) машина интерпретирует пласты таким образом, что последовательность в распределении нефтеносных и водоносных пластов оказалась нарушенной. Так, пласт в интервале 1613,2—1620,8 м машина уверенно относит к нефтеносным (23 голоса за нефть и 0 за воду), пласт в интервале 1620,8—1625,6 м — к водоносным (5 голосов за воду и ни одного за нефть), а пласт в интервале 1625,6—1629,6 м вновь очень уверенно относит к нефтеносным (21 голос за нефть и ни одного за воду). Таким образом, среди нефтеносных пластов на основании заключений машины встречается водоносный пласт. На месторождениях массивного типа с единым ВНК подобная ситуация невозможна.

Следовательно, один из двух пластов узнается машиной неверно. Тот пласт, который интерпретируется машиной менее уверенно, т. е. с меньшей разницей голосов, очевидно, интерпретируется ошибочно. Судя по показаниям НГМ ($\eta_{ny}=4\sigma$), пласт этот является одним из самых плотных пластов, встречаемых в турнейских отложениях.

Из 98 пластов, представленных для экзамена, машина лишь в одном случае дала заведомо ошибочное заключение. Во втором случае имеется прямое противоречие с результатом опробования, при котором получена вода. В данном случае не исключена возможность того, что результаты опробования недостоверны (керна из этого пласта был нефтеносным). Еще в одном случае имеется чередование нефтеносных и водоносных пластов, что невозможно в залежи массивного типа.

При анализе результатов машинной интерпретации по отдельным скважинам обращают на себя внимание следующие факты. Во всех скважинах (за исключением одной) наблюдается строго упорядоченное расположение нефтеносных и водоносных пластов — сверху располагается несколько нефтеносных, а затем следуют водоносные пласты: нигде не наблюдается чередования пластов различного насыщения. Учитывая, что пласты интерпретировались независимо друг от друга, этот факт нужно расценивать как самостоятельное доказательство высо-

кой эффективности машинной интерпретации (даже если бы у нас не было результатов опробования).

Нужно отметить, что принцип упорядоченности широко используется в интерпретации. Анализ геофизических заключений по Красноярской площади подтверждает это.

В шести скважинах имеются пласты, названные геофизиками «возможно нефтеносными». Все эти пласты расположены в зоне водонефтяного контакта (ВНК). В восьми скважинах имеются пласты, по которым нет заключения о нефтенасыщенности (указывается лишь на их «неоднородность» или «чередование уплотненных и проницаемых пропластков» и т. п.). Эти восемь пластов лежат в зоне ВНК. Никогда в геофизических заключениях не нарушается порядок следования пластов в пределах залежи (сверху вниз): вначале идут пласты, охарактеризованные как нефтеносные, затем следуют возможно нефтеносные, затем пласты без определенных заключений и, наконец, водоносные пласты. В заключениях по отдельным скважинам могут отсутствовать некоторые категории пластов (например, нефтеносные или возможно нефтеносные), но порядок их следования никогда не нарушается. Это говорит о том, что принцип упорядоченности пластов (в залежах массивного типа) является критерием интерпретации, который должен быть удовлетворен, несмотря на любые конкретные геофизические характеристики отдельных пластов.

Таким образом, принцип упорядоченности уже учтен в геофизических заключениях и проверять результаты интерпретации с помощью этого принципа бессмысленно. Но результаты машинной интерпретации получены только на основании геофизических характеристик пластов без использования принципа упорядоченности, и поэтому проверка их на критерий упорядоченности позволяет выяснить истинную эффективность работы программ распознавания.

В девяти скважинах (из общего числа 26) машина выделяет ниже интервала перфорации нефтеносные пласты, которые не были опробованы. Многие из них интерпретируются машиной очень уверенно (соотношения голосов 31:0; 16:0; 21:1 и т. д.). Очевидно, что пропуск этих пластов при опробовании вызван перестраховкой — боязнью получить приток воды. Ведь получение притока воды связано с немедленными дополнительными затратами на изоляцию, повторное опробование скважины в вышележащем интервале и т. д. Пропуск же части нефтеносного интервала означает лишь потенциальные потери, которые не связаны с сиюминутными расходами, но зато потери эти могут быть очень велики.

Трещиновато-кавернозные известняки. Осинское месторождение Пермской области представляет собой залежь массивного типа. Нефтеносными породами являются башкирские отложения, представленные мелкозернистыми, пористыми известняками и доломитами. Коэффициент пористости

по керновым данным изменяется от 0,6 до 24 %. Башкирские отложения Осинского месторождения местами кавернозны и трещиноваты. Большие колебания дебитов по скважинам также свидетельствуют о неоднородности карбонатных коллекторов. ВНК принят горизонтальным на отметке 1002 м. Проницаемые участки разреза выделяются по данным НГК, микрозондов и каверномера. Интерпретация геофизических диаграмм с целью оценки насыщения пластов-коллекторов практически не проводилась. Причиной тому малая мощность пластов, наличие экранирующих пластов высокого сопротивления и большая глубина проникновения промывочной жидкости в пласт.

Всего для обучения и распознавания нефтеносных и водоносных пластов было использовано 202 пласта, выделенных геофизиками как коллекторы (из них 120 нефтеносных и 82 водоносных). После обучения машины по 22 нефтеносным и 23 водоносным пластам было проведено распознавание 98 нефтеносных и 59 водоносных пластов.

Имеются два случая несовпадения заключения машины с результатами группового опробования пластов. В трех случаях нарушена последовательность в расположении пластов. Можно указать также на то, что в зоне ВНК, установленного по геологическим данным и отмечаемого с помощью машинной интерпретации, происходит регулярное снижение числа голосов, поданных за нефтеносность пласта, т. е. машина как бы сигнализирует о снижении нефтенасыщенности пластов. По этим данным можно сделать заключение о том, что переходная зона на Осинском месторождении довольно велика по мощности. Результаты опробования показывают, что из переходной зоны в данном месторождении при эксплуатации не поступает вода.

Таким образом, в результате интерпретации 157 пластов имеются шесть случаев, которые могут оказаться ошибочными. Фактически же число ошибок может оказаться меньшим, так как некоторые из этих пластов могут оказаться неколекторами. Следовательно, эффективность работы программы составляет не менее 96 %. Если же геофизик-интерпретатор будет иметь кроме заключений машины и геологическую информацию (о массивном типе залежи), то он сможет исключить еще пять ошибок, а эффективность его заключений в этом случае превысит 99 %.

Вызывает недоумение столь большой разрыв между уровнем машинной интерпретации (4 % ошибок) и уровнем геофизической интерпретации (отказ от интерпретации). Это объясняется тем, что геофизики не могут реализовать стандартный метод интерпретации (определение величины $\rho_{\text{п}}$ по данным БКЗ) — из-за существенного экранирования результаты измерений не совпадали с палеточными кривыми. Однако информация в этих измерениях была — и не малая.

Построив распределение значений $\rho_{\text{к}}$ для 7-метрового зонда по этой площади, можно выбрать порог, с помощью которого

в 80 % случаев можно правильно разделить нефтеносные и водоносные пласты.

В заключении этого параграфа можно сказать, что в задаче интерпретации карбонатных пластов мы столкнулись с новой проблемой — проблемой идентификации объектов (отнесения их к тому или иному классу). Это затрудняет и выбор материала для обучения и оценку эффективности решающего правила. Для преодоления этой трудности была использована априорная информация о массивном типе залежи. В дальнейшем мы попытаемся включить эту информацию как исходно заданную в структуру алгоритма и использовать ее для улучшения решающего правила.

Глава III

ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗНОЙ КАРТЫ

§ 1. ВЫБОР ОБЪЕКТА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу прогнозирования мест возникновения сильных землетрясений [18, 28, 29, 42]. Выбор объекта в данной задаче определился в результате довольно длительной эволюции. Первоначально задача ставилась в традиционном плане районирования сейсмоопасных территорий, точнее говоря, разделения территории на области, в которых возможны (или невозможны) землетрясения с магнитудой выше заданной. С геологических позиций территорию можно представить состоящей из блоков (различного ранга), которые в тектоническом смысле являются однородными по своей истории развития объектами. Однако при таком выборе объекта возникли трудности в его описании. Например, из геологических соображений было ясно, что для прогноза сейсмичности важное значение имеет характеристика интенсивности современных движений блока. Эта характеристика отражена в значениях сдвига данного блока относительно соседних, в контрастности рельефа на границах с другими блоками. Таким образом, возникла необходимость описания всех соседних блоков и зон разломов, ограничивающих данный блок.

В результате описание блока становилось очень громоздким, а главное, важная информация терялась в массе второстепенных деталей. Это заставило отказаться от такого выбора объектов распознавания. Было решено в качестве объектов выделить участки разломов между двумя соседними пересечениями данного разлома с другими. Такой выбор объекта соответствует тому факту, что эпицентры сильных землетрясений лежат на разломах. Нужно сказать, что фактически эпицентры сильных землетрясений не всегда лежат на разломах, однако в такой ситуации многие геологи и геофизики относят этот факт за

счет недостаточной геологической изученности региона. Более того, в некоторых случаях в слабо изученных районах цепочки землетрясений объясняют скрытыми разломами. Однако выбор другого объекта в задаче распознавания ведет к изменению самой постановки задачи. В случае, когда объектом являлась некоторая область (блок земной коры), прогноз должен был выявить территорию, на которой разрушительная сила землетрясений может превзойти заданный уровень. При новом выборе объекта прогноз распространяется уже не на всю территорию, а лишь на зоны разломов на границах блоков и прогнозируются не места значительных разрушений, а лишь места эпицентров сильных землетрясений. В этом случае определение территорий, где возможны значительные разрушения, становится отдельной задачей.

Однако и такой выбор объекта оказался неудовлетворительным. Описывая какой-либо участок разлома, нельзя не учитывать характера разлома на всем его продолжении, а следовательно, необходимо описывать геологические характеристики всех разделяемых разломом блоков. Очевидно, что такое описание страдает всеми недостатками, присущими описанию блоков.

Следующим шагом было выделение в качестве объектов дизъюнктивных узлов. Переход к этому объекту оказался возможным только благодаря следующему обстоятельству: эпицентры сильных землетрясений возникают не на всем протяжении разлома, а лишь в дизъюнктивных узлах — на пересечении данного разлома с другими. Связь между эпицентрами сильных землетрясений и дизъюнктивными узлами отмечается, но далеко не во всех районах. Причина, по которой эта связь затушевывалась, состоит в следующем: в качестве дизъюнктивных узлов рассматривались лишь пересечения разломов друг с другом. При таком определении нередко эпицентры оказывались лежащими на разломе, но вне дизъюнктивных узлов. Если же рассматривать наряду с разломами и морфоструктурные линеаменты, то связь эпицентров сильных землетрясений с морфоструктурными узлами, образованными пересечениями и разломов и линеаментов становится почти безусловной. Таким образом, был окончательно выбран объект распознавания — морфоструктурный узел, образованный пересечением линеаментов [28].

Описанный поиск объекта распознавания не является перебором независимых друг от друга вариантов. Это видно из того, что линеаменты, которые сыграли решающую роль в окончательном формировании объекта распознавания, участвовали уже в формировании самого первого объекта распознавания — однородных блоков земной коры. По самой сути задачи прогноза сейсмичности необходимо было в описании блоков отразить степень активности современных тектонических движений, а отражаются они главным образом в морфологических

характеристиках земной поверхности, в рельефе. Естественное для задач распознавания требование (описание объекта в целом) приводит к выбору однородных объектов. В данном случае это было требованием однородности блоков по морфоструктурным характеристикам. Однако выделение блоков, ограниченных установленными геологическими разломами, показывало, что эти блоки весьма неоднородны по рельефу. Выделение однородных блоков и есть выделение линеаментов — границ между однородными блоками. Таким образом, конструирование адекватного объекта распознавания есть один из способов проникновения в существо проблемы (на ту или иную глубину).

Утверждение о приуроченности эпицентров сильных землетрясений к дизъюнктивным узлам требует в каждом районе своей конкретизации по двум параметрам: определению ранга линеаментов и порогу магнитуд сильных землетрясений. Как правило, рассматривается система линеаментов трех высших рангов, а порог магнитуд устанавливается в 6—7. Морфоструктурная схема Востока Средней Азии дана на рис. 9, морфо-

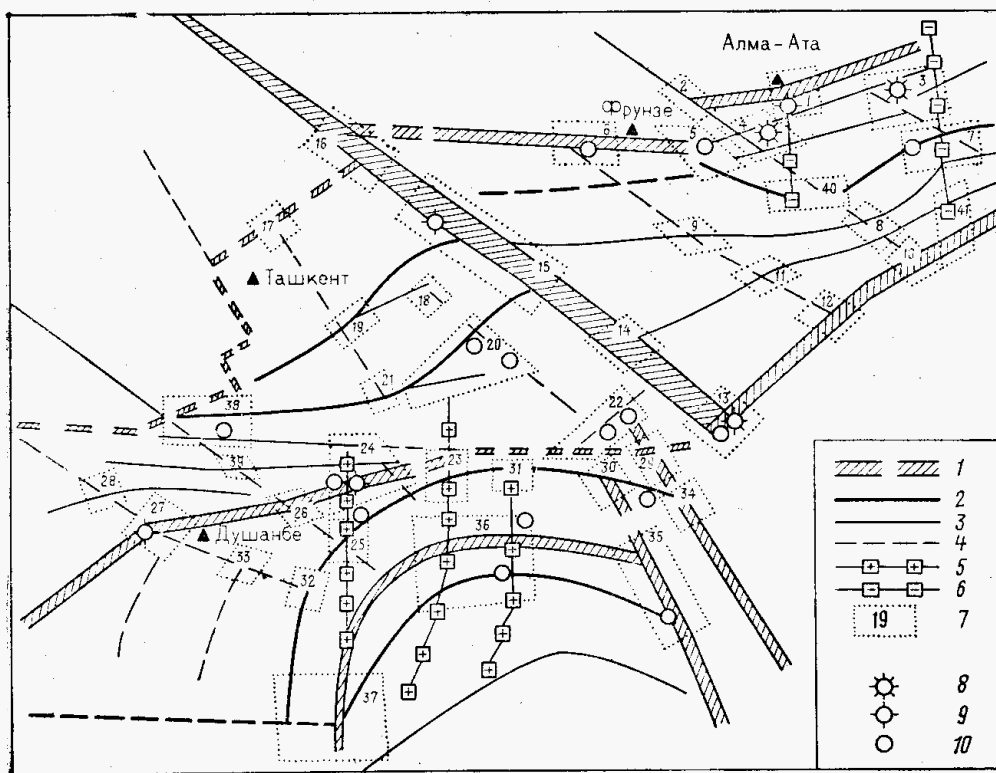


Рис. 9. Зоны глубинных разломов Памира и Тянь-Шаня с активными новейшими движениями [8].

Зоны, продольные относительно осей главных хребтов и котловин и непрерывно выраженные поверхностными разломами: 1 — границы горных стран и морфоструктурных областей, 2 — границы мегаблоков, 3 — границы блоков; зоны, поперечные относительно осей главных хребтов и котловин: 4 — частично выраженные поверхностными разрывами, 5, 6 — прослеживаемые главным образом соответственно по повышению и понижению абсолютных высот; 7 — границы дизъюнктивных узлов и их номер; эпицентры сильных нормальных землетрясений с энергетическим классом: 8 — $K=18$, 9 — $K=17$, 10 — $K=16$

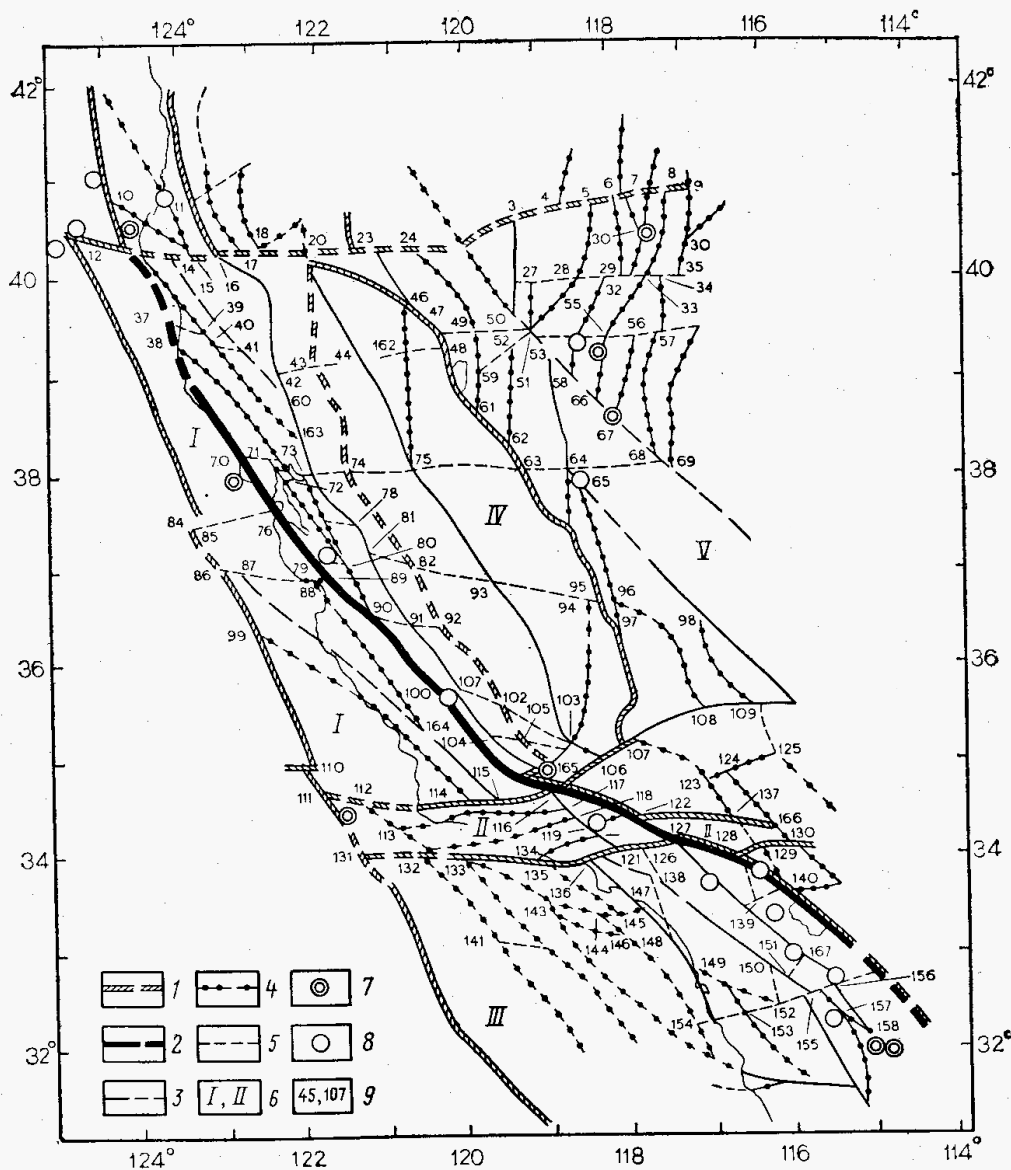


Рис. 10. Линеаменты Калифорнии [10].

1, 3, 4 — линеаменты соответственно 1, 2 и 3-го рангов; 2 — основная ветвь системы Сан-Андреас; 5 — поперечные линеаменты; 6 — номера морфоструктурных стран; 7, 8 — эпицентры землетрясений соответственно с $M \geq 7$ и $7 > M \geq 6,5$; 9 — номера пересечений

структурная схема Калифорнии — на рис. 10. В Средней Азии приуроченность эпицентров к дизъюнктивным узлам справедлива для магнитуд $M \geq 6,5$, в Калифорнии — для $M \geq 6,0$ [28, 35].

Формулировка задачи. Теперь задачу можно сформулировать так. На рассматриваемой территории имеется N морфоструктурных узлов. В n из них лежат эпицентры землетрясений с магнитудой $M \geq M_0$. В остальных $N - n$ узлах такие землетрясения не зарегистрированы. Спрашивается, в каких узлах в будущем можно ожидать землетрясений с $M \geq M_0$?

Во-первых, такие землетрясения могут возникнуть в тех узлах, в которых они уже происходили. Это следует из того, что по существу наших представлений мы связываем максимально возможную силу землетрясений в том или ином узле с конкретной геологической обстановкой. А поскольку геологическая ситуация меняется за промежутки времени значительно большие, чем интересующие нас исторические времена прогноза на будущее, мы должны полагать, что в узлах, где уже произошли землетрясения с $M \geq M_0$, они будут происходить и в будущем. Эти узлы называются высокосейсмичными узлами (В-узлами).

Во-вторых, такие землетрясения могут происходить и в некоторых из $N - n$ узлов, где они еще не зарегистрированы, но происходили в далекие времена и будут происходить в будущем. Следовательно, среди них имеются В-узлы (их мы будем называть В*-узлами) и узлы, в которых невозможны землетрясения с такой магнитудой (Н-узлы). Таким образом, все множество узлов состоит из В-узлов, В*-узлов и Н-узлов.

Задача программы распознавания — выделить множество В*-узлов.

В описанной постановке задачи особенно ясно видно отличие этой задачи от статистических задач классификации. В данном случае нет генеральной совокупности и выборки из генеральной совокупности — все объекты налицо. Поставленная задача есть типичная для геологии задача описания имеющегося материала.

Выбор алгоритма. Материал обучения неточно разделен на два класса. Часть объектов заведомо принадлежит {В}. Но каждый из остальных объектов может быть или В*, или Н, причем объекты В* по предположению сходны с В. Наша задача имеет смысл при гипотезе, что в классе {В*+Н} большинство узлов относится к Н, т. е. что в большинстве высокосейсмичных узлов сильные землетрясения уже успели произойти за период наблюдений, а узлов Н достаточно много. Эта особенность должна была учитываться уже при первичной обработке материала — при оценке информативности параметров и выборе порогов для их квантования. Более того, это потребовало модификации критериев отбора признаков. Обычно программа «Кора-3» отбирает «чистые» признаки — конъюнкции трех переменных, встречающиеся только в одном классе, и притом достаточно часто. В нашей же задаче признаки узлов В должны встречаться на узлах В*, а они входят во II класс. Поэтому мы искали для класса В «нечистые» признаки, которые встречаются не менее K_1 раз среди узлов В и не более \bar{K}_1 раз среди узлов {В*+Н}.

Для узлов Н можно было бы искать чистые признаки, ибо в противоположном классе все узлы принадлежат {В}. Однако, учитывая, что в силу недостаточной изученности узлов их параметры определены с ошибками, мы и для класса Н искали

нечистые признаки, встречающиеся не менее K_2 раз среди $\{B^* + H\}$ и не более K_2 раз среди $\{B\}$; практически всегда принималось $K_2 = 1$.

Эта особенность в значительной мере определяла и выбор решающего правила. Он был основан на разности Δ числа признаков B и H . Обычно правило состоит в том, что к B^* относятся узлы с $\Delta > 0$ (простым большинством голосов). Однако в нашей задаче это неприемлемо: во-первых, цены ошибок 1-го и 2-го рода различны, особенно нежелательны ошибки типа «пропуск цели» (отнесение к H узлов B^*); во-вторых, мы должны идентифицировать B^* по сходству с B , а при использовании нечистых признаков сами узлы B могут иметь $\Delta \leq 0$. Поэтому решающее правило формулировалось так. Пусть Δ_{\min} — минимальное значение Δ для узлов B . К узлам B^* относились узлы с Δ выше или ненамного ниже Δ_{\min} ($\Delta = \Delta_{\min}$ для Памира и Тянь-Шаня; $\Delta = \Delta_{\min} - 2$ для остальных менее изученных регионов).

Обучение и распознавание. Набор характеристик, описывающих дизъюнктивные узлы для региона Памира и Тянь-Шаня, дан в табл. 3. Это простейшее, в основном феноменологическое, описание узлов в том виде, как они сложились к настоящему геологическому времени.

Для Памира и Тянь-Шаня порог по магнитуде $M = 6,5$. Всего выделен 41 узел (см. рис. 9). Из них 16 являются B -узлами: в пределах этих узлов произошли все известные землетрясения с $M \geq 6,5$ до 1970 г. (времени проведения работы), за исклю-

Таблица 3

Описание узлов Памира и Тянь-Шаня

Характеристика узла	Описание узла и значения
Тип разломов	Узел образован нечетким разломом; все остальное
Тип пересечения разломов	Причленение; пересечение
Число разломов	2; 3; 4 и более
Самая крупная морфоструктурная единица, разделяемая разломами	Горная страна; морфоструктурная область; мегаблоки; блоки
Расстояние до ближайшей горной страны, км	30; 30—70; >70
Разломы пересекают	Горную страну; морфоструктурную область
Морфологические сочетания	Горы с предгорными возвышенностями (ПВ) и подгорными равнинами (ПР); горы с ПВ; горы с ПР; горы с горами; ПВ с ПР
Абсолютные высоты, км	3; 3—4; >4
Перепад высот, км	1,5; 1,5—2,5; >2,5
Длина основного разлома, км	300; 300—700; >700
Относительная площадь рыхлых толщ	0,2; 0,2—0,5; >0,5

Таблица 4

Распределение узлов в зависимости от разности числа голосов в ходе сейсмической истории ($\tilde{K}_2=1, \tilde{K}_1=2$)

Разность числа голосов $C_1 - C_2$	Номер узла					
	1889 г.	1902 г.	1911 г.	1938 г.	1970 г.	∞
	2	3	4	5	6	7
11					5, 24	
10						
9					15, 36	5, 24
8				5	25	22
7				1, 4, 6, 25, 36	1, 4, 13	4, 15, 35, 36
6					37*	23*, 37*
5			1, 4, 6 13	13	7, 22 6, 35	7, 25 1, 13 41*
4		35, 38	36	35, 38		3 31*
3		1, 6, 5, 22	5	27, 15, 24	27, 38	6, 27, 38
2		13	3, 27, 35	3, 22	3	
1	1	3	38, 15, 24, 25			
0	6	10 20, 24 2, 12, 16	37*	37*	23*, 31*	26*, 34* 8
-1	5, 7 34*, 37*	15, 27 37*, 26* 21, 29, 32, 40	22		26*	
-2	13, 22, 24, 27	7, 36	7			20
	30, 2, 40, 10, 28, 29	31* 14, 17, 19	23*, 41*	20	41*	
-3	3, 15, 25, 36 26*, 31*, 41* 12, 17, 18, 19, 33	4, 25		7 26*	20 34*	
-4	4, 35	23*, 34*, 41*	20 26*, 31*, 34* 32	31*		32
	9, 11, 16				8, 10	
-5	20, 38 23*			41*		
	8, 14, 21, 32, 39	9, 11, 28, 33, 39	8, 10, 16		16, 32, 40	10, 14, 39, 40
-6			14, 39	34*, 10	14	16, 17, 19, 21, 33
-7		12, 21, 33, 40			2, 12, 17, 19, 29, 30, 39	9, 11, 12, 29, 30

Разность числа голосов $C_1 - C_2$	Номер узла					
	1889 г.	1902 г.	1911 г.	1938 г.	1970 г.	∞
	2	3	4	5	6	7
-8			2, 17, 19, 29	2, 12, 21, 32	21, 33	2, 18
-9			18, 30	8, 14, 29, 40		
-10			9, 41	17	9, 11, 18	28
-11				19, 30	28	
-12			28	39		
-13				9, 11, 18, 23, 28, 33		

Примечание. Номера узлов, в которых известны сильные землетрясения, выделены курсивом; звездочкой отмечены узлы, которые распознаны как высокосейсмические; жирной прямой — сильное землетрясение произошло после года, указанного в столбце.

чением землетрясения 1944 г. Оно было отнесено к ближайшему узлу. Таким образом, в I классе {B} было $N_1=16$ объектов, во II классе {B*+H} — $N_2=25$ объектов.

Распознавание производилось с помощью программы «Кора-3». Параметры алгоритма: $K_1=8$, $\bar{K}_1=2$; $K_2=13$; $\bar{K}_2=1$. Было отобрано 11 признаков B и 11 признаков H.

Результаты распознавания приведены в табл. 4. Обнадешивает, что для большинства узлов II класса перевес голосов против высокой сейсмичности так велик, что они будут отнесены к H при любом разумном выборе порога. Выберем порог по результатам голосования для узла 20 (Андижанского). Он получил перевес в 3 голоса против B. Узлы с еще большим перевесом H будем относить к H, а остальные узлы — к B*, поскольку наша основная задача — избежать пропуска цели. При таком выборе порога получается, что помимо тех узлов, где сильные землетрясения уже известны, высокосейсмичны еще шесть узлов: 37 (Файзабадский), 23 (Алайский), 31 (Заалайский), 26 (Обихингоу-Сурхобский), 41 (Сарыджазский), 34 (Куньлуньский).

Новые шесть высокосейсмичных узлов имеют одну общую черту: все они расположены в зонах контрастных новейших движений на границах горных стран: узлы 26, 23, 31 — на границе Тянь-Шаня с Северо-Таримским прогибом; узел 34 — на границе Куньлуня и Предкуньлуньского прогиба; узел 37 расположен вблизи стыка Памира и Гиндукуша, захватывая южную часть Предпамирского краевого прогиба (напомним, что в узлах 41 и 34 сильные землетрясения, возможно, уже были).

Интересно еще отметить, что узел 37 имеет резкие отличия от остальных новых узлов: сгущение подкоровых очагов и

слияние трех крупных разломов — главной тектонической линии Памира, Рушано-Пшартского разлома и Дарваз-Сафедхирской меридиональной зоны. Эти отличия не отражаются в характеристиках, использованных при распознавании.

§ 2. НАДЕЖНОСТЬ РАСПОЗНАВАНИЯ

В отличие от задачи распознавания нефтеносных пластов по каротажным данным в данной задаче нет независимого материала для экзамена, на котором можно было бы определить надежность решающего правила. При наличии независимого и обширного материала для «экзамена» снимаются многие методические вопросы: обоснованность выбора материала обучения, комплекса характеристик, параметров алгоритма и т. п. Удовлетворительные результаты «экзамена» оправдывают наш способ работы (в пределах разумного) и служат его обоснованием. В случае, когда имеющийся материал ограничен и весь используется при обучении, все эти вопросы встают с полной серьезностью и требуют наиболее полного обоснования. Поэтому в таких задачах все этапы работы должны подвергаться критическому анализу с помощью различных тестов. Опишем некоторые из них.

Скользящее обучение. Из обучения поочередно исключается по одному узлу. Каждый раз проводится свое обучение на оставшемся материале. Пороги \bar{K}_1 и \bar{K}_2 сохраняются теми же, что и в основном варианте, K_1 и K_2 подбираются такими, чтобы по возможности сохранить неизменным число отобранных признаков. Исключенный узел экзаменуется. Стратегия принятия решения — по «наихудшему» В-узлу. Все узлы хорошо распознаются, за исключением узла 20. Он и в основном варианте был наиболее похож на несейсмичные узлы.

Устойчивость распознавания. Естественно ожидать, что хорошее решающее правило устойчиво к «шевелению» параметров K_1 , \bar{K}_1 , K_2 , \bar{K}_2 , вариации значений характеристик в различных узлах¹, самому набору характеристик и даже к смене самого алгоритма распознавания. При вариациях набора характеристик существенным бывает определить, нет ли среди них таких, которые фактически определяют результат распознавания, т. е. исключение которых резко изменяет результаты.

Все тесты такого рода были проделаны в этой задаче и показали устойчивость решающего правила.

¹ Обычно в процессе решения задачи, а чаще всего при анализе ошибок выясняется, что те или иные характеристики объекта распознавания определены неверно или могут быть определены двойко. Внесение таких исправлений может быть нежелательно, так как всегда направлено на улучшение результатов распознавания. Этим обстоятельством можно воспользоваться на этапе проверки устойчивости решающего правила, изменяя эти характеристики.

Ретроспективный анализ. Оценивая надежность решающего правила, мы фактически хотели бы ответить на вопрос: каковы шансы на то, что ближайшее землетрясение попадет в один из узлов В или В*, найденных на основе имеющегося на данный момент времени материала обучения? В связи с этим можно поставить другой вопрос: каковы шансы на то, что последнее из известных землетрясений попало бы в В-узел или В*-узел, если бы проводили распознавание до этого землетрясения? На этот вопрос мы можем ответить. Для этого нужно повторить всю работу в предположении, что один из узлов принадлежит не I классу {В}, а II {В*+Н}. То же самое можно проделать в предположении, что нам неизвестны два последних землетрясения, три и т. д. Решив такую последовательность задач, можно будет судить о том, какова надежность нашего решения.

Результаты такого эксперимента [он был назван «сейсмическая история» (СИ)] приведены в табл. 4. В каждом столбце указана дата последнего землетрясения, включенного в обучение. Узлы в столбце распределены в зависимости от результатов голосования в одном из вариантов обучения. Например, во 2-м столбце использованы лишь пять узлов как В-узлы (6, 1, 3, 35, 13). Это все те узлы, в которых к 1889 г. произошли известные нам землетрясения с $M \geq 6,5$.

Из табл. 4 видно, что уже по данным, имевшимся в 1911 г., можно было распознать как В все те узлы, где сильные землетрясения произошли в следующие 60 лет. В этот момент в обучении участвовало 10 В-узлов¹.

Этот результат позволял надеяться, что и в будущем эпицентры сильных землетрясений будут попадать только в узлы В и В*. Вместе с тем нас может подстерегать и опасность другого рода: со временем, когда произойдут новые землетрясения, новые узлы будут становиться В-узлами, будет проведено новое обучение и новое распознавание будет классифицировать как В*-узлы все новые узлы. И так до тех пор, пока все узлы не распознаются как В*-узлы. Для проверки этой гипотезы эксперимент был продолжен «в будущее» (∞): было принято, будто сильные землетрясения произошли во всех шести узлах В* и эти узлы были включены в I класс. Результаты распознавания даны в 7-м столбце табл. 4. Мы видим, что дополнительно к В*-узлам отнесен всего один узел (узел 8).

Из табл. 4 видно, что выбранный порог обеспечивал отсутствие пропусков цели, начиная с 1911 г. (кроме узла 7 в 1938 г.). Все шесть узлов, где сильные землетрясения произошли впоследствии, лежат выше этого порога. Однако они лежат ниже почти всех узлов, где уже были сильные землетрясения. То же

¹ Аналогичные эксперименты, проведенные в других сейсмоактивных районах, показывают, что минимально приемлемые результаты начинают получаться при наличии в обучении 7—10 В-узлов.

Распределение узлов в зависимости от разности числа голосов в контрольном эксперименте в различные интервалы времени

Разность числа голосов $C_1 - C_2$	Номер узла	
	1885—1911 гг.	1885—1934 гг.
≥ 8	5*	4, 5*, 25, 36
7		3, 15*, 24* 35, 38
6		1, 6, 22*
5	4, 36, 38	13
4	1, 3, 15*, 22*, 24*	
3	6, 13, 35	
2	25*	20
1	20, 27	27
0	7*	7*

Примечание. Из материала обучения исключены узлы, где сильные землетрясения произошли позже рассматриваемого интервала времени. Номера этих узлов отмечены звездочкой.

повторяется и в последующие годы. Этот факт может вызвать сомнение в нашем способе выбора порога. Правда, с другой стороны, этот факт можно объяснить тем, что указанные шесть узлов входили при обучении во II класс, т. е. в $\{H+V^*\}$, поэтому они ближе к узлам H по результатам голосования. Чтобы не было сомнения, распознавание повторили, исключив из обучения рассматриваемые узлы (25, 5, 24, 15, 22, 7 — для 1911 г.; 5, 24, 15, 22, 7 — для 1934 г.). Результаты показаны в табл. 5. Видно, что, будучи исключены из обучения, узлы V^* получают в среднем столько же голосов, сколько и V. Таким образом, указанное сомнение отпадает.

§ 3. СМЕНА ОБЪЕКТА РАСПОЗНАВАНИЯ

Выше было показано, что сильные (с магнитудой $M \geq 6,5$) землетрясения возникают только в пределах крупных морфоструктурных узлов с активными новейшими движениями. Поэтому прогноз места сильных землетрясений сводится к распознаванию узлов, где такие землетрясения возможны, хотя пока неизвестны. Морфоструктурные узлы понимаются как специфические морфоструктуры — зоны повышенной подвижности и тектонической раздробленности с четко выраженными границами [29]. Каждое пересечение линеаментов окружено такой зоной. Она может представлять отдельный дизъюнктивный узел или сливаться с соседними зонами; таким образом, один узел может объединять и несколько пересечений.

Исходные характеристики узлов, использованные для распознавания в работе [9], существенно зависят от того, какие

пересечения объединены в каждом узле. Некоторые характеристики зависят от этого непосредственно (например, число линейных элементов в узле), другие (например, размах высот) могут зависеть потому, что, присоединяя к узлу еще одно пересечение, мы существенно расширяем узел.

Чтобы установить границы узлов (сгруппировать по узлам зоны пересечения линейных элементов), требуются особенно детальные полевые исследования. Это требование не увязывается с характером задачи: с масштабом изучаемого явления (подвижки при сильных землетрясениях охватывают десятки километров по глубине и до сотен километров по простиранию); с относительной простотой тех данных, которые оказывались достаточными для распознавания; с тем, что критерии распознавания для разных регионов сходны и бывают взаимозаменяемы. Благодаря этим обстоятельствам нам и удалось решить задачу, не имея надежных данных о границах узлов.

На основании этого возникла идея рассматривать не морфоструктурные узлы, а отдельные пересечения линейных элементов. Задача сводится к распознаванию пересечений, в окрестности которых возможны сильные землетрясения. При этом возникает дополнительная трудность: нельзя указать заранее, с какими пересечениями связаны уже известные землетрясения, поскольку вблизи одного и того же эпицентра на расстояниях, сравнимых с возможной погрешностью определения его координат, может располагаться несколько пересечений. Для преодоления этой трудности были использованы несколько алгоритмов и в конечном счете разработан специальный алгоритм.

Постановка задачи. Линейные элементы Юго-Восточной Европы и Малой Азии даны на рис. 11. Будем рассматривать точки пересечения их осей (для краткости будем ниже их называть просто пересечениями). Чтобы определить эти точки, требуются значительно менее детальные исследования, чем для определения границ дизъюнктивных узлов. Примем, что верна следующая гипотеза.

Гипотеза. Эпицентры могут располагаться только в окрестности некоторых пересечений (здесь и далее имеются в виду эпицентры землетрясений с $M \geq 6,5$). Для краткости обозначим эти пересечения В — высокосейсмичные, а остальные — Н. При этом мы уже не нуждаемся в гипотезе (впрочем, весьма правдоподобной), что к В относятся все пересечения, входящие в высокосейсмичные узлы.

Среди Н могут быть пересечения H_1 , находящиеся вблизи известного эпицентра, например из-за погрешности определения его координат. Остальные пересечения Н обозначим через H_2 . Аналогично среди В могут быть пересечения B_2 , находящиеся вдали от известных эпицентров, например потому, что вблизи некоторых В землетрясения пока неизвестны. Остальные пересечения В мы обозначим через B_1 .

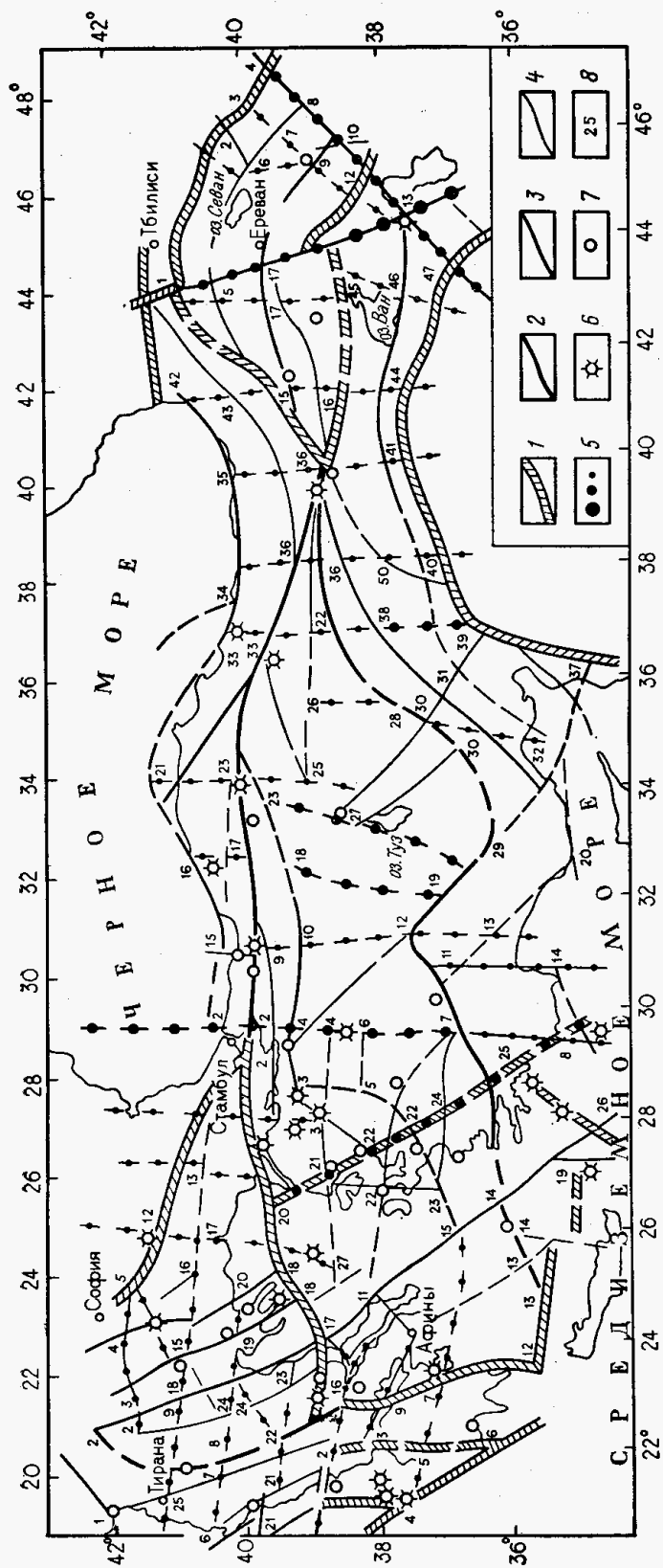


Рис. 11. Линеаменты Юго-Восточной Европы и Малой Азии [8].

Морфоструктурные границы: 1 — регионов, 2 — морфоструктурных стран, 3 — областей, 4 — районов; 5 — поперечные эпицентры сильных землетрясений с магнитудой: 6 — $M \geq 7$, 7 — $6,5 \leq M < 7$, 8 — номера дизъюнктивных узлов

Задача ставится теперь так: даны два класса пересечений; $\{B_1, H_1\}$ и $\{B_2, H_2\}$; требуется разделить их на $\{B_1, B_2\}$ и $\{H_1, H_2\}$. Решение должно удовлетворять очевидному условию; чтобы вблизи известных эпицентров было по крайней мере по одному пересечению B .

Исходные данные. Как и раньше, для распознавания использовались такие характеристики, которые отражают тектоническую раздробленность коры или интенсивность и контрастность новейших движений. Поскольку теперь объекты распознавания — пересечения, а не узлы с их неясными границами, можно полностью формализовать определение этих характеристик. Они перечислены в табл. 6.

Обучение по подклассам. Специально для решения рассматриваемой задачи был разработан алгоритм «Подклассы». Он представляет обобщение программы «Кора-3». Рассмотрим группы пересечений, расположенных в некоторой окрестности каждого эпицентра. Совокупность пересечений

Таблица 6

Исходные характеристики пересечений

Характеристика пересечения	Пороги дискретизации
Абсолютная высота пересечения H_1 , м	200
Градиент $\Delta H/l_1$	1000
Число линеаментов, исходящих из пересечения n_1	150
Тип пересечения линеаментов	300
Выраженность линеамента	3
Расстояние до ближайшего линеамента r_1 , км	Причленение: пересечение
Расстояние до второго ближайшего линеамента r_2 , км	Четкая; нечеткая
Расстояние до второго ближайшего линеамента второго ранга $R_{2,2}$, км	25
Расстояние до второго ближайшего продольного линеамента r_3 , км	25
Расстояние до второго ближайшего поперечного линеамента r_4 , км	62,5
Расстояние до ближайшего пересечения r_5 , км	50
Расстояние до второго ближайшего пересечения r_6 , км	100
Максимальная высота H_{max} , м	0
Минимальная высота H_{min} , м	50
Размах высот ΔH , м	25
Число пересечений n_2	75
Взвешенный ранг линеамента M	0
	37,5
	25
	62,5
	2000
	3000
	2000
	3000
	2
	4
	9
	11

в каждой группе будем рассматривать как один объект I класса. Каждое из остальных пересечений будем рассматривать как один объект II класса. Задача ставится теперь так. Даны два класса объектов: $\{Q [V_1^Q, H_1^Q]\}$ и $\{B_2, H_2\}$, где Q — это определенные выше группы пересечений (подклассы). Требуется распознать все пересечения B (и B_1 , и B_2).

Задача решается следующим образом. Будем считать, что подкласс Q обладает некоторым признаком B , если им обладает хотя бы одно пересечение из этого подкласса. Признаки для распознавания объектов I и II классов найдем по следующему правилу. Признак полезен для распознавания пересечений B , если он встречается $\geq K_1$ раз среди Q и $\leq K_1$ раз среди $\{B_2 + H_2\}$. Признак полезен для распознавания пересечений H , если он встречается $\leq \tilde{K}_2$ раз среди $\{V_1^Q + H_2^Q\}$ и $\geq K_2$ раз среди $\{B_2 + H_2\}$. Однако голосование по этим признакам проведем отдельно для каждого пересечения из обоих классов. По результатам голосования и выделяются высокосейсмичные пересечения $B_1 - B_2$, лежащие соответственно далеко и близко от известных эпицентров.

Таким образом, разделим на B и H каждую группу пересечений, окружающих известные эпицентры. При этом пересечения B могут составлять меньшинство и в I классе и в каждой отдельной группе. Принимается следующая гипотеза.

А. В окрестности большинства эпицентров есть хотя бы одно пересечение B . Это может быть неверно, если окрестности выбраны слишком малыми: меньше, чем зоны повышенной подвижности и раздробленности вокруг большинства пересечений, или меньше, чем погрешность определения большинства эпицентров.

Б. Пересечения, лежащие вне окрестности любого эпицентра, в большинстве относятся к H . Это может быть неверно, если окрестности выбраны слишком большими.

Подклассы выбирались следующим образом. За окрестность эпицентра был принят круг радиусом $\rho_2 = 40$ км. Все пересечения из этой окрестности составляли подкласс.

Таким образом, число подклассов равняется числу землетрясений, используемых в обучении. Число пересечений в подклассе изменялось от 1 до 4.

Результаты распознавания. Результаты распознавания даны в табл. 7, а эксперимента сейсмической истории — в табл. 8. Порог для разделения пересечений на B и H выбирался следующим образом. Пусть Δ_{1Q} — максимальное значение Δ (разности числа признаков B и H) в подклассе Q ; Δ_1 — минимальное значение Δ_{1Q} во всех подклассах. Мы относили к B пересечения с $\Delta > \Delta_1 - 3$ и выделили отдельно две пограничные группы пересечений, примыкающие к этому порогу: с $\Delta = \Delta_1 - 3$ и $\Delta = \Delta_1 - 4$. Выбор порога, как и распознавание в целом, проверяется экспериментом СИ (см. табл. 8).

Результаты голосования при обучении по подклассам ($K_1=8, K_1=4, K_2=13, K_2=1$)

Число голосов C_H	Номера узлов при различном числе голосов C (B)																				
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10										
10	14, 28, 30 ₄ , 35 45 ₁ , 46, 49																				
9	36 ₃ , 43																				
8	29, 38, 50																				
7	10, 13	19 ₁																			
6	18, 20, 26	41 ₂																			
5	6, 22 ₂ , 34 ₂ 41 ₁ , 44 ₂	41 ₁																			
4	39 ₁	31, 47 ₂			19 ₂																
3	16, 32 ₁	21 ₁ , 22 ₁ , 42 ₂	30 ₂ , 36 ₅	24			8 ₁	47 ₁													
2	30 ₁	17 ₁ , 21 ₂ , 32 ₃ 37 ₁	15 ₁ , 30 ₃ , 40 ₄ 37 ₂	15 ₂ , 27 ₃ 1 ₂ , 36 ₂	40 ₃ 34 ₁ , 36 ₁ , 37 ₄ , 48	5, 42 ₁	2 ₁	45 ₂	33 ₂ , 39 ₂ , 42 ₃ 36 ₈	40 ₂											
1	7 ₂ , 12		3 ₃ , 25	3 ₁ , 37 ₅	33 ₁ , 36 ₇	11 ₁ , 11 ₂ , 11 ₃ 23 ₁ , 27 ₂ , 32 ₃ 37 ₃	3 ₄ , 3 ₂ , 9 ₁ , 9 ₃ , 27 ₁	1 ₁ , 1 ₃ , 4 ₁ , 4 ₄ , 8 ₂ , 7 ₁ , 23 ₃ 2 ₂ , 8 ₃ , 36 ₈ 39 ₃	1 ₁ , 1 ₃ , 4 ₁ , 4 ₄ , 8 ₂ , 7 ₁ , 23 ₃ 2 ₂ , 8 ₃ , 36 ₈ 39 ₃	34 ₃ , 34 ₄											
0	36 ₄																				

Примечание. Полу жирный — пересечения, ближайшие к эпицентру; курсив — пересечения, входящие в подклассы; в узлах, содержащих одно пересечение, номер пересечения совпадает с номером узла. В узлах, содержащих несколько пересечений, индекс обозначает номер пересечения в данном узле.

Таблица 8

Изменение голосования в ходе сейсмической истории (СИ) при обучении по подклассам

Номер под-класса	Номер пересечения	Год землетрясения в под-классе	Дата последнего землетрясения в В-узлах													
			1926	1938	1939	1942	1943	1944	1949	1951	1953	1957	1964	1970	8	
Подклассы																
1	6 4 ₃	1970	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			0	0	0	0	0	+	±	±	±	+	+	+	+	
2	3 ₁ 3 ₂ 3 ₄	1964	+	±	±	+	+	+	0	±	±	0	+	±	+	
			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
3	9 ₁ 9 ₃ 9 ₂	1957	±	0	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			±	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			0	0	+	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	
4	3 ₄	1953	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
			+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
16	34 ₄ 34 ₃	1916	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
17	1 ₁	1912	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			+	+	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
18	4 ₂ 4 ₁ 2 ₂ 4 ₄	1905	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			±	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			+	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Пересечения В ₂ +Н ₂																
	1 ₂ 2 ₂ 2 ₃ 5 7 ₂ 8 ₁		±	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0	+	
			0	±	+	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	
			±	±	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	+	0
			±	0	0	±	±	±	±	0	0	0	0	0	0	+
	41 ₂ 42 ₁ 42 ₂ 45 ₂ 47 ₁ 47 ₂ 48		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
			+	±	±	±	±	+	+	+	+	+	+	±	+	
			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
			±	±	+	+	+	+	±	±	±	±	±	±	±	±
			0	0	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0
			±	±	±	+	+	+	0	0	0	0	0	0	±	±

Примечание. Знак «+» — пересечение распознается как В; нуль — пересечение распознается как Н; знак «±» — пограничные результаты голосования ($\Delta = \Delta_1 - 3$).

Обратим внимание на следующее. Начиная с 1939 г. наблюдается такая картина (см. табл. 8): перед каждым из последующих землетрясений место, в котором оно произошло, будет распознано как В* на основании обучения по всем предшествующим землетрясениям, т. е. после 1939 г. места всех землетрясений будут распознаны заблаговременно.

Правда, пересечения 3, 23 и 36 не были распознаны как В; однако это не приводит к пропускам цели, поскольку были распознаны как В соседние пересечения из тех же подклассов. По данным на 1944 г. (в обучении шесть известных землетрясений) распознано хотя бы по одному пересечению из всех шести подклассов, соответствующих землетрясениям последующих лет. Иными словами, были распознаны окрестности всех эпицентров последующих землетрясений. С дальнейшим уменьшением числа известных землетрясений появились пропуски цели. Так, по данным на 1939 г., распознаны окрестности всех эпицентров, кроме двух (1970 и 1943 г.), по данным на 1926 г., распознаны окрестности восьми эпицентров из двенадцати.

Чтобы проверить устойчивость распознавания, эксперимент СИ был продолжен в будущее, приняв, что землетрясения произошли во всех пересечениях B_2 , кроме пограничных с $\Delta = \Delta_1 - 3$. Результаты даны в последнем столбце табл. 8. Видно, что на данном этапе сейсмической истории распознавание весьма устойчиво: к В присоединилось одно пересечение из H_1 и девять из H_2 ; при этом семь из новых пересечений В отнесено к пограничной группе и только два пересечения находятся не вблизи тех пересечений, которые уже ранее отнесены к В.

Заметим, что замена узлов пересечениями улучшила результаты распознавания, быть может, только потому, что границы узлов здесь неизвестны. Даже ориентировочные представления о типичных размерах и форме узлов могли бы быть полезны в рассмотренной задаче. Не исключено, например, что за окрестности пересечений лучше принимать не круги, а области, вытянутые вдоль линеаментов и зависящие от их ранга.

Глава IV

ДОКАЗАТЕЛЬНОСТЬ И ПРАВДОПОДОБИЕ

§ 1. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ДОКАЗАТЕЛЬНОСТИ

За прошедшие четверть века распознавание образов в геологии сформировалось в отдельное научное направление. Наиболее важным результатом работ по распознаванию является введение в обиход геологических и геофизических исследований по прогнозированию и комплексной интерпретации новых понятий — объект распознавания, мера близости, признаковое пространство, материал обучения, материал экзамена, решающее правило,

экзамен, информативность метода, оптимальный комплекс параметров, априорная информация, однородная совокупность объектов и ряд других. Изменение научного языка отражает не только факт использования новых методов решения широкого класса геологических задач, но и стиля постановки и решения научных и практических задач. Новый язык ориентирует геолога на четкое определение объекта исследования, ясную формулировку задачи и необходимость всесторонней проверки эффективности решающего правила. Важнейшим звеном здесь является требование доказательства эффективности решающего правила. Именно при попытках доказать эффективность решающего правила исследователь наталкивается на огрехи и ошибки при определении объекта распознавания и постановке задач. Отсутствие этапа доказательства полученного результата позволяет решать плохо поставленные задачи на плохо определенных объектах.

Поскольку распознавание образов было новым для геологии методом качественного классифицирования объектов, оно должно было доказывать свою работоспособность. Кроме того, решающие правила, полученные с помощью программ распознавания, по сути своей требовали подтверждения своей эффективности. В обычной практике обработки геологических и геофизических данных, когда устанавливалась зависимость между двумя или тремя переменными и выборка, по которой строилась зависимость, была достаточно представительной, это не вызвало каких-либо осложнений. При использовании же программ распознавания на вычислительных машинах такая ситуация недопустима. Дело в том, что целый ряд программ распознавания в принципе не делает ошибок на материале обучения, однако неясно, как хорошо они будут экстраполировать, т. е. как хорошо они смогут распознавать новый материал. Можно представить себе следующий алгоритм: программа запоминает все нефтеносные и водоносные пласты из обучения; когда приходит новый пласт для экзамена, она сравнивает его с каждым пластом из обучения, хранящимся в ее памяти: если экзаменуемый пласт в точности совпадает с каким-нибудь из нефтеносных (или водоносных) пластов, записанных в памяти, то он классифицируется как нефтеносный (или водоносный). В противном случае машина отказывается от заключения. Ясно, что такая программа будет превосходно делить материал, на котором она училась, и совершенно будет бессильна на каком-либо другом материале, т. е. ее способность к экстраполяции равна нулю.

Все это вызвало необходимость в разработке системы доказательств эффективности решающих правил. С этой целью нужно было в первую очередь оценить эффективность существовавших в это время традиционных методов интерпретации геологических и геофизических данных. С сожалением можно констатировать, что в обычных схемах работ по прогнозированию отсутствует элемент проверки полученных эмпирических законо-

мерностей на независимом материале (материале экзамена) или подтверждение этих закономерностей иным способом.

Эта традиция настолько сильна, что, несмотря на использование методов распознавания, она господствует по-прежнему.

Во многих работах, посвященных описанию алгоритмов автоматической интерпретации данных каротажа, описывается множество алгоритмов выделения пластов и оценки их содержания, однако нигде не ставится вопрос о том, какова эффективность этих алгоритмов. Поскольку в принципе эти алгоритмы повторяют алгоритмы ручной интерпретации, то очевидно, что их эффективность находится на таком же уровне. А уровень этот нередко бывает очень низким, вплоть до полного отказа от интерпретации (см. § 2, гл. II). Но ведь главная цель автоматизации интерпретации — повышение эффективности геологических заключений. Следовательно, разработке любых автоматизированных систем должен предшествовать анализ экономического эффекта их использования. Всем известны трудности экономического анализа эффективности геологических заключений. Однако имеются соображения, которые позволяют хотя бы предварительно ответить на поставленный вопрос без подробного экономического анализа.

Известно, что ошибки геологических заключений (пропуск залежи или продуктивного горизонта или исследование пустого объекта), как правило, обходятся гораздо дороже, чем проведение комплекса соответствующих косвенных исследований, а тем более, чем углубленный анализ уже имеющихся данных. Следовательно, если показано, что предлагаемый метод анализа имеющихся данных приводит к существенному уменьшению ошибочных заключений (например, в 2 раза в каждом из классов), то можно сделать вывод об экономической целесообразности использования этого метода¹.

В некоторых последних работах по прогнозированию, в которых используются математические методы (регрессионный анализ или распознавание образов), строится решающее правило, которое не исследуется на эффективность на независимом материале. Авторы, очевидно, считают достаточным, чтобы решающее правило основывалось на «правильной» геологической модели. В действительности же проблема заключается в том, чтобы, доказав эффективность решающего правила, получить довод в пользу положенной в основу геологической модели. Именно довод в пользу модели, а не подтверждение модели, ибо признаки, используемые для классификации, могут быть получены и в рамках других моделей.

Во многих работах по прогнозированию присутствует идея проверки эффективности решающего правила, однако она

¹ Конечно, при сравнении результатов интерпретации необходимо учитывать цены ошибок 1-го и 2-го рода, однако практика показала, что программы распознавания уменьшают число ошибок в обоих классах по сравнению с традиционными методами.

реализуется недостаточно полно, например проводится проверка только на материале обучения. При этом нередко используются статистические критерии оценки вероятности ошибки. Очевидно, что такая оценка может оказаться несостоятельной. Дело в том, что такие оценки ведутся по комплексу признаков, отобранных, как правило, из большого числа кандидатов. Понятно, что даже из случайных признаков, если их достаточно много, можно набрать некоторое число информативных, на основе которых можно получить хорошее разделение материала обучения: ведь выбор этого набора признаков ведется именно по критерию минимума ошибок на материале обучения. Сделать это тем легче чем меньше число объектов в материале обучения. Эти соображения можно подкрепить и некоторым математическим анализом, изложенным в работе Ф. А. Айду, А. Д. Деева и А. И. Нейштадта (1983 г.). Хотя анализ ведется методами математической статистики и ориентирован на дискриминантный анализ, качественные выводы относятся к любым методам распознавания в многомерных пространствах.

Описание методов распознавания геологических объектов вошло во многие вузовские учебники. Среди докладов, представленных от СССР на 27-й Международный геологический конгресс (Москва, 1984 г.) по проблеме «математическая геология», был и доклад, где излагалась сущность геологических задач распознавания в многомерных пространствах (правда, в очень ограниченной интерпретации). И все же нужно признать, что, хотя работ по применению методов распознавания в геологии и геофизике много, примеров практического использования этих результатов слишком мало. Нельзя не задуматься над причиной этого явления.

Конечно, имеет место консерватизм. Это и консерватизм геологов и консерватизм геологического мышления. Однако прежде всего необходимо оговорить, что мы здесь рассматриваем консерватизм не как безусловно отрицательное качество, а лишь как определение свойства системы сохранять свое состояние. В этом качестве консерватизм — обязательное свойство любой действующей системы: если бы система откликалась на каждое внешнее воздействие, то она не успевала бы приходить в устойчивое состояние и была бы неспособна к организованной деятельности. Конечно, под давлением объективных аргументов и геологи и геология изменяются. Поэтому наша задача — проанализировать ситуацию и понять, каких аргументов не хватает работам по распознаванию, чтобы преодолеть консерватизм.

Итак, существует следующая ситуация. Имеются результаты прогнозирования различных геологических объектов (нефтеносных пластов, залежей нефти и газа, рудных месторождений и т. д.). Среди них имеются такие, которые выдержали всевозможные методы проверки эффективности полученного прогноза, удовлетворившие математиков и геологов, принимавших участие в работе. Вместе с тем потребитель (тот, кто принимает реше-

ние об очередности опробования объектов) игнорирует эти прогнозы. Именно игнорирует, а не возражает против них или оспаривает их обоснованность. Именно не замечает, хотя знает об их существовании.

Как может возникнуть такая ситуация? Она может возникнуть в том случае, если потребителю не нужен предлагаемый продукт. А в чем суть предлагаемого продукта? Он сулит (по крайней мере в авторском его описании) большее приближение к истине по сравнению с имевшимся прогнозом или используемой тактикой. Следовательно, можно предположить, что потребитель не нуждается в приближении к истине. Став на такую точку зрения, требуется пояснить взаимоотношения потребителя и истины.

Истина, а в данном случае это истинное знание о состоянии геологических объектов, безусловно необходима с глобальных позиций, с позиций потребностей всего народного хозяйства страны. Однако потребителю, представляющему интерес своего хозяйственного подразделения, для решения ближайших задач нужна только правда, но не вся правда. Для примера рассмотрим задачу определения нефтеносности пластов в пределах многопластовой залежи. Выше приводились примеры, когда высокоэффективная интерпретация показывала, что перфорация пластов регулярно велась существенно выше отметки водонефтяного контакта (Азнакаево ТатАССР, Красноярка Оренбургской области). Можно было полагать, что такая тактика принята из-за неуверенной интерпретации пластов геофизиками в зоне водонефтяного контакта. Вследствие этого велик был риск получения при перфорации этих пластов воды с нефтью или воды, что связано с затратами на изоляцию пласта, с задержкой ввода в эксплуатацию скважины. Естественно, что в случае, когда новый метод интерпретации обещает высокую надежность заключений, такие ошибки и связанные с ними расходы становятся относительно небольшими, а вовлечение в разработку нефтеносного пласта мощностью примерно в 10 м, безусловно, окупит затраты на ликвидацию ошибочных опробований. Окупит, но с позиций всего народного хозяйства и спустя длительное время. А затраты необходимо произвести сегодня и из ограниченных фондов данного предприятия.

Отмеченное противоречие не порождено чьей-то нерадивостью или неквалифицированностью. Это противоречие принципиальное. Проблема сочетания общегосударственных интересов и местных интересов, отдаленных и ближайших целей — непростая проблема.

Так складывается ситуация, когда геолог вполне удовлетворен существующим уровнем интерпретации и экономически не заинтересован в повышении ее эффективности в трудных случаях, а именно в зоне водонефтяного контакта. Геологи-разведчики были бы, вероятно, заинтересованы в повышении эффективности интерпретации в первых скважинах на новых площадях. Однако сейчас методы распознавания не могут помочь

в такой ситуации — ведь им необходим в той или иной форме материал для обучения и на самой начальной стадии разведки они, как правило, не могут быть использованы.

Таким образом, точность геологических заключений не определяет однозначно их ценность для потребителя. Для определения их ценности необходимо также учитывать стратегию принятия решений потребителем.

Другим потребителем знаний о характере насыщения пласта мог бы стать геолог, подсчитывающий запасы месторождения. Ведь прежде всего необходимо определить объекты, подлежащие подсчету. Казалось бы, есть резон использовать для этой процедуры программы распознавания, обещающие более точные результаты и большее приближение к истине. Однако и в этой ситуации истина многолика. С точки зрения организации, утверждающей подсчет запасов, истинным может быть только такой подсчет запасов, который удовлетворяет утвержденным инструкциям по проведению подсчета запасов (необходимое, хотя и недостаточное условие). В инструкциях, в частности, оговорены методы определения нефтенасыщенности пластов. Конечно, в них нет прямого запрета на использование результатов распознавания, но это требует от исполнителя дополнительно большого объема обоснований.

Таким образом, понятие об истинности с точки зрения комиссии по подсчету запасов сужено (по сравнению с глобальной истинностью) введением определенных нормативов. И это опять же не является отрицательной характеристикой положения, ибо без регламентации не может существовать нормативная деятельность.

§ 2. ОБОСНОВАНИЕ РЕШАЮЩЕГО ПРАВИЛА

Исключительно важный аспект рассматриваемой проблемы — вопрос обоснования решающего правила. В этом вопросе существуют глубокие расхождения между геологической традицией и математической. Математическая традиция обоснования результатов следует двум линиям. Первая линия связана с аксиоматическим построением теории и дедуктивным аппаратом вывода. Доказанным считается результат, который получен из исходных аксиом путем применения строго определенных правил вывода. Очевидно, что такой путь обоснования результата неприемлем в геологических задачах. Другая линия связана с оперированием экспериментальными данными и основывается на методах теории вероятностей и математической статистики. В этом случае обоснованными оказываются лишь утверждения о вероятности тех или иных гипотез.

Такой метод обоснования гораздо ближе к геологической практике и имеет давнюю историю применения в геологии. Однако есть и существенные трудности в использовании статистических методов для обоснования геологических заключений.

Одна из них связана с необходимостью принятия предположений о существовании генеральной совокупности объектов, априорных распределений, репрезентативной выборки. Другая связана с трактовкой доверительных уровней. Сошлемся на высказывания геолога Ю. С. Салина [32] по этому вопросу, с которыми автор полностью согласен: статистические характеристики «введены для изучения массовых однородных случайных событий или величин, реализуемых, например, при многократном бросании монеты или кости, при конвейерном производстве одинаковых деталей. Понятен смысл и некоторых статистических характеристик единичных объектов, например, 95 %-ной надежности какой-либо одной детали: это означает, что она взята из той партии одинаковых деталей, в которой только 95 из каждых 100 работают безотказно в течение положенного срока. И если некоторое единичное устройство состоит из 120 разных деталей 95 %-ной надежности, можно уверенно предсказать, что оно сломается, не отработав требуемого времени. Но что такое 95 %-ная вероятность или 5 %-ный уровень значимости при корреляции ланской и курнальской толщ? Если бы мы коррелировали тысячу пар совершенно одинаковых курнальских и ланских толщ, то (при условии справедливости принятых геологических посылок) уровень значимости 5 % означал бы, что в среднем из каждой сотни 95 сопоставлений были бы верны а пять — ошибочны. Такие сведения были бы полезными, например, при массовом промышленном разбуривании территории; мы могли бы заранее планировать затраты на 5 % скважин, пустых по вине стратиграфов. Но что такое 5 %-ный уровень значимости при корреляции единственной курнальской толщи с единственной ланской толщей, каков смысл расчленения единственной скважины по трем признакам с уровнем значимости 0,05? Вряд ли могут принести большую пользу столь неясные характеристики».

Имеется еще одна практическая трудность в использовании статистических методов доказательства геологических заключений — небольшое число объектов, доступных исследованию.

По совокупности указанных выше причин математики далеко не всегда могут гарантировать надежность результатов, а геологи не могут принять вероятностно-статистические методы доказательства. Выше были описаны некоторые логические методы обоснования решающих правил: правило упорядоченности нефтеносных и водоносных пластов внутри залежи, эксперименты «сейсмическая история» и «сейсмическое будущее», требование устойчивости к возмущениям. Предлагаемые методы близки к геологическому мышлению, ибо формулируются на языке «здравого смысла». С другой стороны, они фиксируют внимание на процедуре «обоснование истинности».

Со своей стороны геологическая наука использует совершенно иные способы обоснования истинности своих суждений. Внешне они повторяют систему дедуктивного вывода: формули-

руются модели и рассматриваются следствия, выводы из модели. Обоснованным считается суждение, которое следует из модели (или теории). Важной особенностью геологических теорий (или моделей) является их генетический характер. Оправдано это историческим характером всех геологических процессов, а обусловлено тем, что привлечение категории времени делает модели гораздо богаче, сохраняя возможности оперирования ими в процессе мышления. Для примера можно указать на то, что человек с невероятным трудом оперирует в уме с четырехмерными аналогами реальных объектов (шаров и кубов), однако с исключительной легкостью оперирует с объектами в четырехмерном пространстве (трехмерном пространстве плюс время). Отсюда понятна приверженность геологов к генетическим моделям. Академик Ю. А. Косыгин пишет, что только «высшие» эволюционные, генетические построения удостоиваются титула теоретических [32]. Ю. С. Салин повторяет эту мысль, утверждая, что в наше время безраздельно господствуют историко-генетические построения [32]. Ю. А. Воронин пишет, что геолог при проверке полученного решения опирается в первую очередь на генетические представления, а затем на данные наблюдения [8].

В дальнейшем (см. гл. VI) мы еще вернемся к статусу генетических теорий в геологии и покажем, что построение и использование генетических моделей имеет глубокие корни в психологии зрительного восприятия (а подавляющая часть геологической информации поступает через зрение).

Приверженность геологов и геофизиков к получению результатов, обоснованных принятой теорией, можно проиллюстрировать на примере, описанном в § 3 гл. II. При интерпретации данных каротажа на месторождении Карабулак-Ачалуки в отложениях апта (карбонаты со сложной структурой порового пространства) геофизики отказывались от выдачи заключений о характере насыщения пласта. Причиной тому была невозможность проинтерпретировать данные БКЗ с помощью известных методов (очевидно, в связи с тем, что реальная геометрия среды не соответствовала геометрии принятой модели). Вместе с тем элементарная статистическая обработка результатов измерений кажущегося электрического сопротивления одним лишь зондом позволяет разделить нефтеносные и водоносные пласты в 80 % случаев. Однако такой результат оказывается неприемлемым: хотя он обоснован статистически, он не является следствием принятой теории (теории интерпретации данных БКЗ).

Однако теоретические построения в геологии имеют существенные недостатки. Во-первых, используемые модели плохо определены и поэтому в процессе вывода приходится их дополнять (иногда явно, а чаще неявно). Это вносит произвол в получение выводов. Во-вторых, модели обычно достаточно сложны. Поэтому всегда находятся факторы, действующие в противополож-

ных направлениях, и при качественном рассмотрении можно придать большой вес любому из них и получить любое из противоположных следствий. Именно эти свойства генетических моделей и вызывают резкую критику, а не их эволюционный или генетический характер.

Таким образом, выявляется реальное различие между трактовками в обоснованности геологических заключений математиками и геологами. В настоящее время математики могут с помощью вычислительных машин получить результаты, обоснованные в статистическом и (или) логическом аспекте. Однако ни ЭВМ, ни те, кто с ними работает, не могут обосновать результаты, используя какие-либо геологические теории: как правило, решающие правила сформулированы совсем не в геологических терминах. А без такого обоснования они для геологов не имеют статуса обоснованных результатов. Ведь, в свою очередь, геологи здраво рассуждают (и знают это по своему собственному опыту), что при дефиците объектов исследования и обилии их описаний из них можно извлечь весьма фантастические результаты. Поэтому серьезно обоснованные с точки зрения математиков результаты распознавания представляются абсолютно необоснованными с точки зрения геологов.

Описанное положение не является исключительным и наблюдается не только в геологии. Такое же отношение встречаются диагностические программы распознавания со стороны медиков. Более того, оказывается, что мы имеем дело с некоторыми глубокими свойствами нашего мышления. Выявилось это в течение последних 20 лет в работах по искусственному интеллекту. На заре развития этих исследований казалось, что для моделирования свойств интеллекта в первую очередь необходимо реализовать на ЭВМ алгоритмы логического вывода. Кое-какие успехи в этом направлении были достигнуты. Однако вскоре стало ясно, что реализовать интеллектуальное поведение на базе лишь строгой логики не удастся. Оказалось, что для имитации интеллектуального поведения важно не столько имитировать умение продуцировать утверждения истинные, сколько правдоподобные. Чтобы утверждение было правдоподобным, вовсе не обязательно, чтобы оно было истинным. Для правдоподобия нужно, чтобы или сам субъект, принимающий сообщение, мог обосновать его, или (в противном случае) необходимо сопроводить сообщение пояснениями, которые проясняют его правдоподобность. Правдоподобие заключается в выводимости сообщения (как логической возможности) из предположений, принимаемых субъектом как истинные (а не из действительно истинных). Таким образом, одно и то же сообщение может оказаться правдоподобным для одного субъекта и неправдоподобным для другого. Примечательно, что в предыдущие десятилетия большой популярностью пользовалась книга Д. Пойа «Математика и правдоподобные рассуждения». Очевидно, что автор сумел предвосхитить тот интерес к правдоподобным рассужде-

ниям, который наблюдается в настоящее время. Однако Д. Пойа интересовался правдоподобными рассуждениями как инструментом для достижения точного знания. Теперь же выясняется, что правдоподобные рассуждения имеют самостоятельную ценность, по крайней мере, в сфере коммуникации.

Кстати, приведем мнение Д. Пойа об отличии доказательного рассуждения и правдоподобного рассуждения. Он пишет, что в строгом рассуждении главное — отличать доказательство от догадки. В правдоподобном рассуждении главное — отличать одну догадку от другой, более разумную догадку от менее разумной [27].

Известна приверженность геологов к следующему построению работ: сначала излагается общее утверждение, а затем показывается его справедливость на примерах. Согласно Д. Пойа, таким путем достигается правдоподобие; предположительное общее утверждение становится более правдоподобным, если оно подтверждается для нового частного случая.

Резюмируя сказанное, нужно признать, что даже самые замечательные результаты распознавания имеют мало шансов быть принятыми геологами, если эти результаты не будут выглядеть правдоподобными, т. е. они должны быть снабжены пояснениями, показывающими их выводимость из принятых моделей (см. § 1 гл. IX). С помощью анализа информативности признаков в различных ситуациях было показано, что связи между геофизическими характеристиками, которые использованы программой при конструировании решающего правила, соответствуют известным геофизическим моделям. И все же такое обоснование оказывается недостаточно явным. Более желательной, например, представляется такая форма обоснования, которая снабжает каждый из характеристических признаков, получаемых в программе «Кора-3», отдельным обоснованием.

Итак, в данной главе рассмотрено решение различных задач с помощью программ распознавания. Именно «с помощью программ распознавания», а не «методом распознавания». Это означает, что процесс решения задачи содержит ряд этапов и лишь один из них представляет собой построение решающего правила в многомерном пространстве. На этом этапе используются программы распознавания, и соответственно это учитывается на других этапах решения задачи. Наша цель — анализ специфики работы с распознающими программами на всех этапах решения задачи. В каждой из этих задач возникал свой комплекс проблем, требовавших неформальных методов решения, т. е. методов, которые не могут быть перечислены заранее вместе с условиями их применимости. В задачах интерпретации данных каротажа это были проблемы кодирования и подбора материала для обучения, в прогнозе мест сильных землетрясений — проблемы выбора объекта распознавания и проверки решающего правила, в задаче построения прогнозной карты — разбиение объектов на классы.

Однако если бы дело ограничилось пересказом тех или иных приемов, пригодных только для своей конкретной ситуации, то вряд ли это принесло бы пользу читателю. Анализ неформальной деятельности по необходимости является поиском таких аспектов этой деятельности или таких ее фрагментов, которые носят более или менее общий характер, т. е. могут быть использованы и в других задачах. Иначе говоря, анализ неформальной деятельности должен заканчиваться ее формализацией (хотя бы частичной).

Этот путь привел к созданию методов кодирования данных (разбиение значений непрерывных параметров на интервалы), методов проверки эффективности решающего правила при дефиците материала обучения (ретроспективный анализ, асимптотическая устойчивость, скользящий экзамен), методов анализа решающего правила с целью построения модели класса объектов (анализ семейств ϵ -эквивалентных признаков, изменения информативности параметров), методов преобразования исходного пространства (введение комбинированных параметров). Некоторые из этих методов уже реализованы в виде алгоритмов (например, скользящий экзамен и автоматическое кодирование данных включены в вычислительную систему для обработки данных). Методы преобразования исходного пространства находят применение в медицинских задачах. Ретроспективный анализ решающего правила был использован в задаче предсказания исхода президентских выборов в США. Асимптотическая устойчивость решающего правила стала предметом формализации не только на алгоритмическом, но и на математическом уровне.

Часть вторая

АНАЛИЗ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Использование априорной информации — необходимая часть человеческой деятельности, как практической, так и научной. Особенно остро эта проблема возникает в задачах обучения методам решения задач — обучения людей и обучения вычислительных машин. Трудности профессионального обучения в таких областях знаний, как геология или медицина, общеизвестны. Профессии геолога или врача трудно обучиться исключительно по книгам, т. е. с помощью передачи информации в явном виде. В этих профессиях широко используется показ квалифицированной деятельности. В ситуации показа, демонстрации деятельности используются широкие интеллектуальные возможности учащегося — его умение схватывать важное, обобщать частные случаи и т. п. Однако эти процессы с трудом контролируются и управляются, а чаще всего и не осознаются.

Гораздо более тяжелая ситуация наблюдается при обучении вычислительных машин. Единственный способ передачи сведений машине — с помощью языка. Причем не естественного языка, на котором происходит общение между людьми, а с помощью исключительно скудного машинного языка. Поэтому возникает необходимость перевода знаний, сформулированных на нашем языке, на машинный язык, т. е. программирования. Но этим не исчерпываются трудности обучения вычислительных машин. Необходимо еще скомпенсировать отсутствие у машины общей подготовки, знания общих законов материального мира (даже на бытовом уровне), наблюдательности, сообразительности, т. е. все то, что считается в общении между людьми само собой разумеющимся, необходимо формулировать в явном виде. Вот пример, иллюстрирующий такого рода трудности, из области решения задач распознавания образов в медицине.

Была поставлена задача прогнозирования давления в легочной артерии на различных стадиях одного из врожденных пороков сердца (дефект межжелудочковой перегородки) по данным электрокардиограммы. Врачи определили набор электрокардиографических признаков, по которым должна решаться задача (т. е. задали пространство параметров). В процессе решения задачи проводился анализ ошибок полученного решающего правила. Математики обратили внимание на следующее совпадение: ошибки приходились на больных в возрасте 14—16 лет, а основную массу больных составляли дети в возрасте 5—10 лет. Когда этот факт сообщили врачам, они пришли в недоумение

от нашего незнания столь элементарных истин: у детей с возрастом закономерно изменяется вид электрокардиограммы. То, что было нормой у малышей, оказывается отклонением от нормы у подростков. Возник вопрос: почему врачи не сообщили в числе признаков, которые необходимо учитывать при диагнозе, возраст больного? Потому, очевидно, что информацию о возрасте больного врач получает «естественным» путем, не акцентируя своего внимания на процесс получения этой априорной информации. Когда врач смотрит ребенка и его кардиограмму, он не должен задаваться вопросом о том, сколько ребенку лет: 5 или 15?

Можно указать на другой пример, в котором априорная информация выражена в наиболее абстрактной форме и имеет соответственно широчайшее поле использования. Каждый грамотный человек знаком с принципом алфавита.

Алфавит — величайшее достижение человечества. И не только потому, что алфавит является материальной основой языка, а тем самым и всей человеческой культуры. Алфавит является замечательным достижением и как принцип конструирования разнообразных и сложных объектов из небольшого числа элементарных объектов. Этот принцип использует каждый, кто владеет речью, а в явном виде с ним знакомится каждый, кто овладевает грамотой языка, основанного на алфавитной письменности. Этот принцип верно служил и служит человечеству в течение тысячелетий. Он лег в основу многих великих теорий и технологий. Перечислим лишь некоторые из них: теория, согласно которой все тела построены из четырех начал, великая автомистическая теория древнегреческой философии, химическая теория элементов, теория элементарных частиц, построение приборов из унифицированных элементов (радиоприемников, телевизоров и вычислительных машин), построение зданий из унифицированных блоков. Сам принцип идеального построения науки на основе небольшого числа аксиом и правил вывода есть принцип алфавита. Без преувеличения можно сказать, что наша система представлений о мире несет на себе печать одной из основных структур нашего языка — структуры алфавита.

Такая точка зрения наводит на мысль о том, что у народов, письменность которых носит не алфавитный, а иероглифический характер, принцип алфавита не является столь распространенным и доступным для репродуцирования, а следовательно, система представлений о мире может оказаться существенно отличной от нашей. Может быть, и этот фактор (наряду со многими другими) определил своеобразие развития философии естествознания (а также технологии) в Китае и Японии. При этом необходимо заметить, что у этих народов устная речь допускает алфавитное представление, однако отсутствует осознание этого принципа, выраженное в алфавитном представлении письменной речи.

В предыдущих главах обсуждался вопрос об использовании априорной информации при анализе геологических и геофизи-

ческих данных с помощью программ распознавания образов. Кодирование исходного описания методом «ступенькой» основывается на априорном предположении о монотонной связи какого-либо параметра описания объектов с искомым свойством, например кажущегося удельного электрического сопротивления породы с ее нефтенасыщенностью (при постоянстве прочих условий). Способ оценки эффективности решающего правила (при отсутствии материала экзамена) основывается на априорном предположении о массивном типе залежи и отсутствии в пределах залежи чередования нефтеносных и водоносных пластов (принцип упорядоченности).

Проблема использования априорной информации пронизывает все области и все стадии любого исследования. Поэтому мы уже сталкивались с этой проблемой в предыдущих главах и будем обсуждать ее в последующих частях книги. В этой же части книги будут обсуждаться такие задачи, в которых использование априорной информации становится решающим звеном. Однако прежде чем перейти к рассмотрению геологических и геофизических задач, остановимся на некоторых математических аспектах этой проблемы.

Обращаясь к математическим аспектам использования априорной информации, нельзя не начать с формулы Байеса (известной также как формула вероятности гипотез или теорема гипотез). Формула эта известна всем, кто знакомился с основами теории вероятностей, и в нее входят величины, называемые априорными вероятностями гипотез. Сравнивая вероятности различных гипотез H_i (при наличии события A), можно выбрать гипотезу, обладающую наибольшей вероятностью:

$$P(H_i/A) = P(H_i) P(A/H_i) / P(A), \quad (2.1)$$

где $P(H_i)$ — априорные вероятности гипотез.

Эта формула позволяет использовать априорную информацию о вероятностях различных гипотез и тем самым повысить вероятность правильного ответа. Использование этой формулы ограничено условиями применимости вероятностных методов вообще. А именно на ней нельзя основывать своего решения в единичных конкретных случаях. Она применима только в том случае, если многократно принимаются решения на различных объектах. Вот как предостерегает один из создателей современной статистики В. Феллер от необоснованного использования формулы Байеса [36]:

«До развития современной теории понятие равновероятности часто отождествляли с «отсутствием предварительных сведений». Сам Лаплас для иллюстрации пользы формулы (2.1) вычислял вероятность того, что на следующий день взойдет Солнце, в предположении, что оно восходило ежедневно 5000 лет (или $n = 1\,826\,213$ дней подряд). Передают, что Лаплас готов был ставить 1 826 214 против 1 за то, что Солнце не изменит своего поведения; в наше время следовало бы увеличить ставку, по-

сколько регулярное движение Солнца наблюдалось в течение еще одного столетия. Чтобы отдать должное Лапласу и понять его намерения, потребовалось бы историческое исследование. Последователи Лапласа, однако, использовали аналогичные доводы в повседневной работе и рекомендовали физикам и инженерам применять такие методы в случаях, в которых формулы не имеют никакого действительного смысла...

В практической работе подобные рассуждения могут привести к опасным последствиям. Инженер по контролю качества продукции имеет дело с одной конкретной машиной, а не с бесконечным множеством машин, из которого наугад выбрана одна. Между тем ему советуют пользоваться формулой Байеса на том основании, что она логически приемлема и соответствует нашей манере мышления. Такими доводами Платон пользовался для доказательства существования Атлантиды; некоторые философы применяют эти же доводы для доказательства нелепости механики Ньютона. В нашем случае эти доводы не учитывают того обстоятельства, что инженер желает достичь определенного успеха и что он поступит лучше, оценивая и доводя до минимума источники различного рода ошибок в своих предвидениях и догадках».

Последнее замечание особенно знаменательно звучит из уст одного из ведущих статистиков нашего века: прежде чем использовать статистические методы, необходимо поглубже разобраться в существе проблемы. Известный польский математик и популяризатор Г. Штейнгауз об этом же пишет, что когда к вам обращается инженер с просьбой о помощи в использовании математических методов, то в 9 случаях из 10 оказывается, что он плохо разбирается в своих собственных проблемах.

По существу, все применение математических методов статистики основывается на использовании априорной информации. Прежде всего это предположение о существовании функции распределения вероятностей. Многочисленные методы статистики основаны на предположении о виде функции распределения вероятностей (в частности, о нормальном законе распределения случайной величины). Ни по каким данным нельзя решить вопрос о том, каким законом распределения они в действительности порождены. Можно лишь оценить вероятность гипотезы, что они порождены тем или иным конкретным законом распределения. Сама математическая статистика не порождает этих гипотез, она лишь оценивает их. К сожалению, очень часто мы порождаем гипотезы о том или ином виде функции распределения не по содержательным соображениям, а лишь потому, что для данной гипотезы (например, для нормального закона) разработан обширный математический аппарат.

Использование математических моделей в геологии и геофизике требует в каждом случае явного указания на все предположения и ограничения, использованные в модели. С одной стороны, это создает привычку к формулировке всех исходных

предпосылок и в тех случаях, когда исследуются лишь качественные модели (тем самым поднимается культура научных исследований). С другой стороны, в каждом конкретном случае это требует осознания и явной формулировки интуитивно и негласно принимаемых предпосылок.

Геологическая интерпретация огромного количества геофизических данных требует решения задач электроразведки, гравиразведки, магниторазведки, сейсморазведки. Как правило, решение этих задач неоднозначно и для выбора возможного решения необходимы априорные предпосылки — о форме границ, о числе границ, о постоянстве свойств и т. д. Во многих случаях решения получаются неустойчивыми и тогда используют методы регуляризации, накладывая на решения априорные ограничения (например, об ограниченности спектра или об ограниченности производных и т. д.).

Нельзя не отметить и то, что иногда встречаются случаи некорректного использования априорной информации. Например, во многих руководствах по корреляции разрезов предлагается прежде всего выделить в разрезе реперы, которые прослеживаются на большой территории, а затем уж переходить к более детальной корреляции. Однако наличие реперов не является априорной информацией — их выделение само есть результат корреляции. Такой алгоритм является некорректным, ибо он вводит нас в порочный круг. Использование априорных реперов возможно лишь в частном случае корреляции, например когда на заданной территории уже проведена корреляция по многим скважинам и в разрезе выделены реперы и требуется привязать новую скважину к этому разрезу.

Аналогичные соображения высказывает Ю. С. Салин [32]: предварительные условия, которые надо выяснить до использования модели, практически невыполнимы — ведь выяснить геологическую (осадочную и структурную) историю до корреляции, значит попасть в логический круг, использовать средства взаимности из будущих результатов.

Перейдем к изложению некоторых задач анализа геологических и геофизических данных, в которых осознание и использование априорной информации позволяет существенно улучшить решение задач или расширить класс решаемых задач.

Глава V

АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

§ 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПА УПОРЯДОЧЕННОСТИ

Формализация геологических задач часто приводит к тому, что с помощью программ распознавания решается не совсем та задача, с которой в подобной ситуации имеет дело геолог или

геофизик. Так, распознавание нефтеносных и водоносных пластов всегда основывалось только на промыслово-геофизических данных и проводилось для каждого объекта в отдельности. Но геологи и геофизики, определяя, нефтеносны ли исследуемые отложения, пользуются не только промыслово-геофизическими данными. Они располагают и определенной геологической информацией о залежи, которая им частично известна априори, частично же получена в результате опробования скважин. Пользуясь этими данными, геологи и геофизики значительно сужают круг возможных решений, оставляя лишь те, которые удовлетворяют их представлениям о расположении нефтеносных и водоносных пластов на месторождении. Задача, которую фактически решают геологи, состоит чаще всего в определении положения водонефтяного контакта на месторождении, а не характера насыщения каждого отдельного пласта. Зная отметку водонефтяного контакта и границы залежи, геолог определяет характер насыщения пластов в зависимости от их положения относительно этих двух ориентиров.

Задача обучения машины распознаванию нефтеносных и водоносных пластов в обычной постановке более сложна — требуется получить разделяющее правило для определения характера насыщения каждого отдельного пласта-коллектора, выделенного по промыслово-геофизическим данным в разрезе скважины, вне зависимости от результатов интерпретации, полученных по другим пластам. При этом геологическая информация о залежи не учитывается, хотя она уже получена в результате опробования скважин.

Это привело к мысли об использовании при распознавании априорной геологической информации о совокупности объектов. Иногда в задачах, где нет достоверного материала для обучения, отсутствие данных об опробованных пластах можно будет восполнить за счет априорной геологической информации.

К такой информации на нефтяных месторождениях массивного типа относится факт упорядоченного расположения нефтеносных и водоносных пластов в разрезе каждой скважины: между двумя пластами, насыщенными нефтью, лежит также нефтяной пласт; между двумя водоносными — водоносный пласт. Кроме того, известно, что нефтеносные пласты обычно лежат выше водоносных. Лишь в одной точке разреза могут соседствовать нефтеносный и водоносный пласты — в зоне водонефтяного контакта.

Если известно, что залежь в исследуемых отложениях массивного типа, то можно предложить алгоритм, основанный на предположении, что в разрезе скважины нефтеносные пласты залегают выше водоносных, нигде не чередуясь с ними.

При геометрической трактовке задач распознавания процесс обучения машины заключается в построении n -мерной поверх-

ности $f(\vec{x})=0$, наилучшим образом разделяющей точки I и II

классов. В обычной постановке задач распознавания наилучшим считается такое разделение, при котором достигается минимум ошибок на материале обучения. В задачах, о которых идет речь, нет опробованных пластов для составления обучающей последовательности, но есть некоторые другие критерии качества разделяющей поверхности, основанные на имеющейся априорной геологической информации. Поэтому при отсутствии примеров для обучения можно искать такую разделяющую поверхность, при которой результат разделения будет наилучшим образом соответствовать нашим представлениям об упорядоченном расположении нефтеносных и водоносных пластов в пределах залежи.

Предположим, что в пространстве промыслово-геофизических параметров существует плоскость, разделяющая нефтеносные и водоносные пласты. Если плоскость проведена случайным образом, то, естественно, полученное деление пластов на два класса не будет делением их на нефтеносные и водоносные. При этом, если проследить, как расположатся пласты, отнесенные машиной к разным классам, в пределах каждой скважины, то окажется, что они расположены беспорядочно, чередуясь друг с другом (рис. 12, б). Будем двигать разделяющую плоскость в n -мерном пространстве, стараясь уменьшить неупорядоченность в расположении пластов разных классов для каждой скважины. В частности, когда плоскость станет в правильное положение, неупорядоченность будет минимальной (рис. 12, в).

Введем некоторую функцию неупорядоченности K . Пусть эта функция минимальна, когда число неупорядоченных пластов минимально. Будем считать неупорядоченным такой пласт-коллектор, у которого оба соседних пласта-коллектора при данном

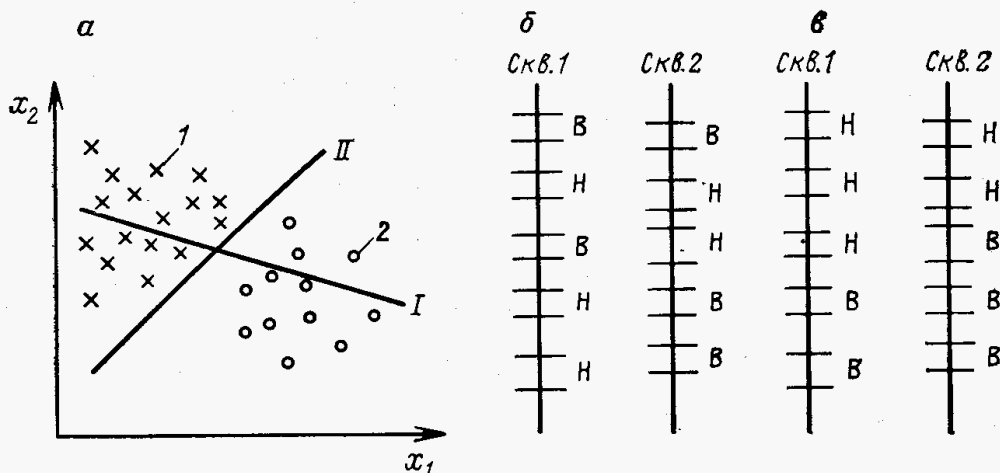


Рис. 12. Разделение пластов на два класса с помощью гиперплоскостей I и II (а), приводящее к неупорядоченному расположению пластов в скважине (б) и упорядоченному их расположению (в).

Пласты: 1 — нефтеносные, 2 — водоносные

положении разделяющей плоскости относится к другому классу, чем он сам (самый верхний и самый нижний пласт в каждой скважине, таким образом, всегда считаются упорядоченными).

Эта функция на каждой плоскости принимает свое значение, т. е. является функционалом на множестве всех плоскостей. Поиск плоскости, обеспечивающей минимальное число неупорядоченных пластов, будет сводиться к поиску минимума функционала $K[f(\vec{x})]$ в пространстве переменных $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, определяющих разделяющую плоскость $f(\vec{x}) = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \dots + \alpha_n x_n = 0$.

Можно было задать функционал K в виде числа неупорядоченных пластов, но тогда он был бы дискретной функцией.

Метод «оврагов», включающий в себя градиентный метод поиска минимума, требует, чтобы функционал K был функцией, дифференцируемой по переменным $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$. Отсюда следует, что функция K не может принимать дискретные значения. Запишем функционал K в виде

$$K(f(\vec{x})) = \sum_i F_i. \quad (2.2)$$

Суммирование ведется только по тем точкам, которые соответствуют неупорядоченным пластам.

Функция F_i , которая называется функцией штрафа, задается как функция евклидова расстояния ρ_i i -й точки от разделяющей гиперплоскости в n -мерном пространстве: $F_i = F(\rho_i)$. Данный вид функции штрафа и идея нормирования исходных параметров были предложены И. М. Гельфандом.

Значения $F(\rho)$ определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} F(\rho) &= 1, \text{ если } \rho \geq c; \\ F(\rho) &= \rho/c, \text{ если } \rho < c, \end{aligned} \quad (2.3)$$

где c — некоторая константа (см. рис. 6).

Сформулировав критерий качества разделения $K[f(\vec{x})]$, являющийся функционалом от разделяющей поверхности, поставленную задачу можно свести к задаче отыскания экстремума этого функционала в пространстве параметров, определяющих разделяющую поверхность.

Для поиска экстремума функционала, зависящего от многих переменных, можно использовать метод «оврагов», опирающийся не только на локальные, но и глобальные свойства функции. В основе метода «оврагов» лежит гипотеза о том, что функция $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$, минимум которой определяется, является «хорошо организованной» функцией. Под «хорошей организацией» функции понимается возможность разбиения параметров x_1, x_2, \dots, x_n на две группы — существенных и несущественных переменных. Число существенных переменных называется размерностью оврага. Разбиение параметров на

существенные и несущественные переменные зависят от точки пространства аргументов функции F . Важно, чтобы это разбиение изменялось не слишком сильно при движении от точки к точке и чтобы само разбиение осуществлялось автоматически в ходе поиска.

В ходе поиска методом «оврагов» разделяющая плоскость перемещается и соответственно изменяется число неупорядоченных пластов и значение функционала $K[f(\vec{x})]$. Желательно, чтобы в результате каждого градиентного спуска плоскость могла принять лучшее положение, т. е. повернуться так, чтобы перевести в другое полупространство хотя бы часть точек, соответствующих неупорядоченным пластам, или уменьшить их расстояние до разделяющей плоскости. При этом не должны появиться новые неупорядоченные пласты. Для этого плоскость должна перемещаться на небольшое расстояние, ориентируясь в первую очередь на те неупорядоченные пласты, которые расположены близко от нее.

Как следует из формул (2.2) и (2.3), направление перемещения плоскости во время градиентных спусков, определяемое вектором $\left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha_i} \right\}$, как раз и будет зависеть лишь от положения тех точек, которые соответствуют неупорядоченным пластам и расположены близко от плоскости (на расстоянии, меньшем c). Неупорядоченные пласты, расположенные от плоскости на расстоянии, большем \tilde{C} , влияют только на величину функционала K , указывая на качество разделения, и не влияют на движение плоскости, так как функция штрафа F для точек, соответствующих этим пластам, есть величина постоянная $\left(\frac{\partial F}{\partial \alpha_i} = 0 \right)$.

Итак, при каждом новом положении плоскости вычисляются значения разделяющей функции $f(\vec{x})$ на всех пластах. Отыскиваются неупорядоченные пласты, т. е. те, у которых знак разделяющей функции не совпадает со знаком этой функции на соседних пластах в той же скважине. Для каждого неупорядоченного пласта вычисляется функция штрафа $F(\rho)$, и после нахождения всех неупорядоченных пластов определяется функционал $K[f(\vec{x})]$, соответствующий этой разделяющей плоскости.

Таким образом, неупорядоченные пласты выбираются в реальном геологическом пространстве, функционал $K[f(\vec{x})]$ вычисляется в пространстве параметров $\{\vec{x}\}$, а минимум отыскивается в пространстве переменных $\{\vec{\alpha}\}$.

Когда в ходе поиска плоскость займет положение, при котором не останется неупорядоченных пластов, функционал $K[f(\vec{x})]$ примет минимальное значение, равное 0, и поиск прекратится.

Отсутствие неупорядоченных пластов еще не гарантирует того, что найденная плоскость действительно делит пласты на нефтеносные и водоносные. Например, ошибочное определение характера насыщения пласта, лежащего около водонефтяного контакта, не приведет к нарушению упорядоченности в разрезе скважины, точно так же как и ошибка в определении характера насыщения самого нижнего пласта в разрезе нефтеносной скважины или самого верхнего — в разрезе водоносной скважины.

Однако можно полагать, что, чем больше пластов в разрезе каждой скважины, тем больше вероятность того, что неправильное разделение будет приводить к появлению неупорядоченных пластов. А это означает, что с увеличением числа пластов в скважинах возрастает вероятность того, что плоскость, на которой функционал K принял минимальное значение, является искомой разделяющей плоскостью. В большой степени этому условию удовлетворяют залежи массивного типа. Тем не менее использовать алгоритм можно и на месторождениях других типов. При этом следует иметь в виду, что с уменьшением числа пластов в скважинах эффективность алгоритма уменьшается.

Полученные с помощью данного алгоритма результаты всегда можно оценить с точки зрения дополнительных, не заложенных в алгоритм критериев качества разделения исходя из следующего:

1) при построении функционала $K[f(\vec{x})]$ совершенно не учитывался тот факт, что в каждой скважине нефтеносные пласты должны быть расположены выше водоносных, поэтому полученную с помощью данного алгоритма разделяющую плоскость прежде всего можно оценить с точки зрения того, действительно ли в каждой скважине пласты, отнесенные машиной к I классу, расположены выше пластов, отнесенных машиной ко II классу;

2) правильно ли узнаются опробованные пласты, если таковые имеются;

3) возможно ли по результатам, полученным во всех скважинах, провести горизонтальный водонефтяной контакт в пределах структуры.

Описанный алгоритм был опробован в башкировизейской карбонатной толще Осинского и Батырбайского месторождений (Пермская область), в карбонатных отложениях турнейского яруса на Красноярском месторождении (Оренбургская область) и в песчаниках девона на Ромашкинском месторождении (Татария).

Геофизические параметры, характеризующие каждый пласт, нормировались следующим образом:

$$x_{ij}^n = (x_{ij} - \bar{x}_j) / \sigma_j, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad j = 1, 2, \dots, n,$$

где N — число пластов; n — число параметров; x_{ij} — исходное

значение j -го параметра в i -м пласте; x_{ij}^n — нормированное значение j -го параметра в i -м пласте, \bar{x}_j и σ_j — среднеарифметическое значение и среднеквадратическое отклонение j -го параметра.

После нормировки значения всех параметров становятся величинами одного порядка и примерно с одинаковым разбросом. Тем самым всем параметрам первоначально придается как бы одинаковый вес.

Так как водонефтяной контакт на этих месторождениях установлен и характер насыщения пластов известен, то эффективность решающего правила (разделяющей гиперплоскости) оценивалась числом ошибочных заключений.

Приступая к поиску разделяющей плоскости методом «оврагов», необходимо знать:

- 1) начальную точку $\vec{\alpha}_0$ (начальное положение разделяющей плоскости),
- 2) первоначальное направление движения по оврагу,
- 3) переменные, в пространстве которых будет проходить поиск минимума функционала,
- 4) константы h, Δ, c (см. § 6 гл. I).

Программа ведет поиск до тех пор, пока разделяющая плоскость не займет положение, при котором уже не останется неупорядоченных пластов. При этом желательно, чтобы каждое неправильное (с точки зрения разделения пластов на нефтеносные и водоносные) положение плоскости отразилось в появлению неупорядоченных пластов. Важную роль при этом играет размерность пространства, в котором ведется поиск (при заданном числе объектов).

Чем больше размерность пространства, тем более редким становится исходное множество точек и увеличивается множество гиперплоскостей, которые можно провести, не нарушая упорядоченного расположения пластов в скважинах. Исходя из этого, целесообразно вести поиск в пространстве меньшего числа параметров. Когда же плоскость принимает положение, близкое к положению искомой разделяющей плоскости, сокращение числа переменных может затруднить поиск, так как всегда существует опасность, что в пространстве небольшой размерности вообще нельзя отделить плоскостью нефтеносные пласты от водоносных.

Однако наибольшее значение для поиска имеет выбор начальной плоскости. Можно ожидать, что, задав эту плоскость не случайным образом, а в какой-то степени близкой к искомой, с помощью данного алгоритма удастся получить правильное разделение пластов по характеру насыщения. При выборе начальной точки принимаются во внимание следующие соображения.

В большинстве случаев, приступая к решению задачи, можно выбрать один или два параметра, по каждому из которых

более или менее удовлетворительно удастся разделить пласты на нефтеносные и водоносные. Обычно такими параметрами являются кажущиеся удельные электрические сопротивления, измеренные зондами БКЗ больших размеров. На диаграммах этих зондов нефтеносные пласты в основном отмечаются более высокими значениями кажущихся сопротивлений, а водоносные пласты — более низкими. Если в качестве решающего правила выбрать среднее значение кажущегося сопротивления на одном из таких зондов, то все пласты, у которых кажущиеся сопротивления больше этого значения, будут отнесены к одному классу, а пласты, у которых кажущиеся сопротивления меньше этого значения, — к другому. В большинстве случаев это ориентировочное деление пластов на классы, т. е. нефтеносные и водоносные.

В данном алгоритме начальная плоскость выбирается так, что коэффициенты при одной или нескольких переменных были существенно больше остальных.

Другой способ выбора начальной точки оврага состоит в использовании разделяющей плоскости, полученной ранее на каком-нибудь другом месторождении. В большинстве случаев наилучшие результаты разделения нефтеносных и водоносных пластов наблюдаются не при нулевом значении функционала, а при наличии одного-двух неупорядоченных пластов. Равенство нулю числа неупорядоченных пластов достигается лишь на такой разделяющей функции, при которой почти все пласты оказываются отнесенными к одному классу. Очевидно, по имеющемуся набору параметров вообще нельзя провести плоскость так, чтобы все нефтеносные и водоносные пласты безошибочно разделились этой плоскостью.

Другими словами, результат решения задачи зависит также и от того, существует ли решение в том классе функций, в котором мы его ищем. Если на данном месторождении не существует плоскости, безошибочно разделяющей все нефтеносные и водоносные пласты, то даже если найдена наилучшая разделяющая плоскость, упорядоченное расположение пластов в скважинах из-за наличия ошибок может быть нарушено. Причем чем больше пластов в разрез каждой скважины, тем больше вероятность того, что неправильное разделение приведет к появлению неупорядоченных пластов.

Если на исследуемом месторождении есть несколько опробованных пластов, то можно потребовать от программы, чтобы кроме минимизации числа неупорядоченных пластов плоскость правильно классифицировала и эти опробованные пласты.

Будем искать минимум такого функционала $K[f(\vec{x})] = \sum_i F_i$, в котором суммирование ведется как по неупорядоченным пластам, так и по тем пластам, в которых есть результаты опробования. В данном случае функция штрафа $F_i = F(\rho_i)$ будет определяться следующими соотношениями.

Для неупорядоченных пластов

$F(\rho) = 1$, если $\rho \geq C$;

$F(\rho) = \rho/C$, если $\rho < C$.

Для опробованных пластов

$F(\rho) = Q$, если опробованный пласт узнается неправильно ($Q \gg 1$); $F(\rho) = 0$, если опробованный пласт узнается правильно,

причем заранее задается знак разделяющей функции в нефтеносных и водоносных пластах.

Таким образом, функционал $K[f(\vec{x})]$ сильно возрастает, если разделяющая плоскость займет такое положение, при котором опробованные пласты окажутся ошибочно отнесенными к противоположному классу. При вычислении вектора направления $\left\{ \frac{\partial F}{\partial \alpha_i} \right\}$ неправильно распознанные пласты будут учитываться, причем коэффициент при производной для них будет взят равным Q .

В алгоритме минимум функционала будет достигнут на такой разделяющей функции, при которой все опробованные пласты распознаются правильно и число неупорядоченных пластов равно нулю. Теперь плоскость не может сдвинуться в крайнее положение, когда все пласты оказываются отнесенными к одному классу, так как при этом опробованные пласты противоположного класса будут распознаны неверно. Разделение пластов на нефтеносные и водоносные с помощью данного алгоритма в значительно меньшей степени зависит от выбора начального положения разделяющей плоскости, так как, использовав дополнительную информацию об опробованных пластах, мы наложили дополнительные ограничения на функционал $K[f(\vec{x})]$.

Эффективность алгоритма существенно зависит от числа пластов в разрезе каждой скважины: чем оно больше, тем больше вероятность того, что ошибочное разделение пластов на нефтеносные и водоносные будет обнаружено программой по нарушению упорядоченного расположения пластов в скважинах. Результат решения также зависит и от того, насколько хорошо решалась бы задача распознавания при наличии достоверного материала для обучения (в этом случае на перечисленных выше месторождениях эффективность решения составляла соответственно 99, 95, 93 и 70 %).

§ 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДЫДУЩЕГО ОПЫТА В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНАВАНИЯ

Стандартная методика решения задач распознавания предполагает, что при переходе в новый регион необходимо заново сформировать материал обучения и получить новое решающее

правило. Но здравый смысл и геологический опыт говорят о том, что предыдущий опыт может помочь решению той же задачи в новом районе. Вопрос заключается в том, каким образом этот опыт может быть использован. Мы рассмотрим несколько возможностей.

Перенос критериев. Самый простой случай — это переход в близкий регион, не отличающийся по геологическим условиям от исходного. В этом случае можно попытаться использовать имеющееся решающее правило без всяких изменений. Именно так были использованы признаки разделения нефтеносных и водоносных пластов девонских песчаников, полученные с помощью программы «Кора-3» на Ромашкинском месторождении (см. гл. II). С их помощью были проинтерпретированы около 500 пластов девонских песчаников соседних нефтеносных площадей (Азнакаевской, Восточно-Сулеевской, Ново-Елховской, Северо-Альметьевской). Лишь в трех случаях заключения машины не совпали с результатами опробования. Однако попытки расширить область применимости решающего правила на более отдаленные площади оказались неудачными: на девонских пластах Нурлатской, Мокшинской, Ульяновской, Черемшанской и Кутуш-Кадеевской площадей было получено около 30 % ошибок.

Полученный результат говорит о том, что коллекторы этих районов в значительной степени отличаются по своим геофизическим характеристикам от коллекторов Ромашкинского месторождения.

Для анализа геофизических материалов по разведочным площадям строились кривые распределений геофизических параметров и сравнивались с аналогичными кривыми, полученными

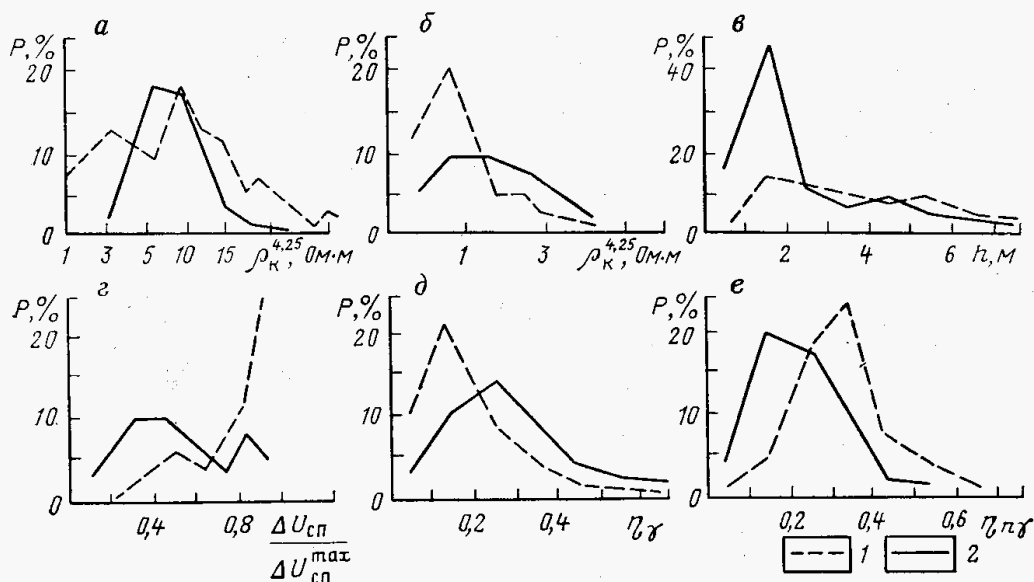


Рис. 13. Распределение значений параметров на Ромашкинском месторождении (1) и разведочных площадях Татарии (2)

для Ромашкинского месторождения. На рис. 13, а, б, где приведены распределения значений кажущихся сопротивлений для нефтеносных и водоносных пластов, видно, что зоны перекрытий значений кажущихся сопротивлений, т. е. интервал значений кажущихся сопротивлений, которыми характеризуются как нефтеносные, так и водоносные пласты, различаются для Ромашкинского месторождения и разведочных площадей. Кривые распределения значений относительно амплитуд ПС, параметров НГМ и ГМ для пластов разведочных площадей (рис. 13, в—е) также существенно отличаются от соответствующих распределений для пластов Ромашкинского месторождения (Азнакаевской площади).

Обращает на себя внимание и тот факт, что на разведочных площадях по сравнению с Ромашкинским месторождением преобладают пласты небольшой мощности. Можно было полагать, что все различия, которые наблюдаются в кривых распределения различных геофизических параметров по пластам разведочных площадей и Ромашкинского месторождения, объясняются различием в распределении мощностей девонских пластов. Для проверки этого предположения были построены распределения параметров НГМ, ГМ и относительной амплитуды ПС ($\Delta U_{\text{ПС}}/\Delta U_{\text{ПС}}^{\text{max}}$) в пластах мощностью от 1 до 2 м на разведочных площадях и на Ромашкинском месторождении. Однако и в этом случае кривые распределения оказываются различными. Следовательно, нельзя объяснить различия в кривых распределения геофизических параметров только изменением распределения мощностей. Возможно, оно объясняется различием более тонких петрофизических свойств, чем те, которые обычно исследуются и которые оказались одинаковыми для коллекторов разведочных площадей и Ромашкинского месторождения. Если бы удалось установить, чем именно отличаются коллекторы этих районов, то, введя во входной вектор параметры, отражающие эти различия, можно было бы получить единые признаки для интерпретации материалов разведочных площадей и Ромашкинского месторождения.

Возможен и другой путь создания единого решающего правила: представить описания пластов в таком виде, чтобы признаки продуктивности оставались инвариантными для различных месторождений. Какие есть предпосылки для решения задачи в такой постановке?

При качественной интерпретации данных каротажа геофизик чаще всего не обращает внимания на масштаб записи кривых. Это относится не только к кривым ГК, НГК, ПС, показаний каверномера, но и к кривым кажущихся сопротивлений, которые являются основными при выделении нефтеносных пластов. Для характеристики значений геофизических параметров в пласте обычно используют термины «низкие», «средние» и «высокие», причем в различных геологических условиях они соответствуют различным абсолютным значениям: в песчаниках

сопротивление 20—30 Ом·м означает высокое сопротивление, а в известняках — низкое. Понятия «низкое», «среднее» и «высокое» по отношению к значениям геофизических параметров есть понятия относительные, возникающие при анализе совокупности значений параметра, встречающихся в пластах исследуемых отложений в одной скважине или в группе скважин. Именно поэтому геофизику для качественной интерпретации по какому-нибудь пласту необходимо видеть всю диаграмму, записанную в отложениях данного комплекса.

Опыт, накопленный геофизикой, говорит, что при прочих равных условиях водоносные пласты характеризуются низкими значениями, а нефтеносные — высокими (низкие и высокие здесь в относительном смысле). Поэтому, для того чтобы и программа могла этот эффект зафиксировать в своей памяти, необходимо, чтобы показания различных методов выражались не в абсолютной шкале, а относительно среднего значения. Для этого можно кодировать значения каждого параметра в различных задачах однотипным способом. Если, например, кривые распределения значений какого-либо параметра для нефтеносных и водоносных пластов отличаются друг от друга, то в качестве границ интервалов для квантования можно выбрать границы зоны перекрытия и несколько равностоящих точек внутри этой зоны (рис. 14). Во входном векторе за этим параметром закрепляются определенные разряды. При такой кодировке 1 в левом крайнем разряде всегда будет означать, что пласт обладает низкими сопротивлениями (по отношению ко всем исследуемым пластам-коллекторам), а 1 в правом крайнем разряде — что пласт обладает высоким (по сравнению с другими пластами) сопротивлением. Если же параметр имеет одинаковые кривые распределения для нефтеносных и водоносных пластов (например, показания ГК, НГК, ПС), то границы интервалов для квантования можно задать из условий, чтобы в каждый интервал попадало примерно одинаковое число объектов. При распознавании пластов разведочных площадей по признакам Ромашкинского месторождения доля ошибок упала до 20 % (по сравнению с 30 % ошибок при распознавании без использования инвариантного кодирования).

Аналогичная ситуация имела место в цикле задач по распознаванию мест возникновения сильных землетрясений [18, 28, 35, 42]. Можно ли использовать признаки сейсмичности, полученные для Средней Азии в новом регионе (Анатолия, Закавказье, Балканы, Эгейское море)? Чтобы ответить на этот вопрос, все узлы нового региона предварительно были закодированы инвариантным образом, как это уже было описано выше. Поскольку все четыре региона

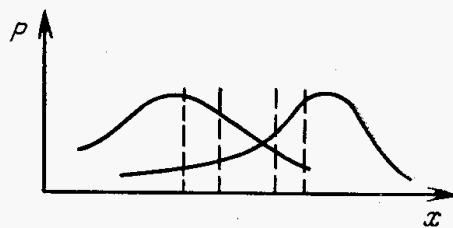


Рис. 14. Выбор порогов квантования

весьма различны по геоморфологическому облику, пороги для кодирования выбирались различными для Балкан, Эгейского моря и Анатолии с Закавказьем.

Всего по схеме морфоструктурного районирования (см. рис. 11) было выделено 119 дизъюнктивных узлов. В 36 узлах (В-узлах) произошли землетрясения с магнитудой $M \geq 6,5$. По признакам сейсмичности, полученным для Средней Азии, правильно распознанными оказались 34 из 36 В-узлов. Распознавание устойчиво: оно сохраняется при уменьшении порога M до 6,3, при изменении порогов квантования на $\pm 10\%$. Правильно распознаются также 14 из 17 узлов, в которых по инструментальным данным были девяти- и десятибалльные землетрясения. Вместе с тем результаты распознавания нельзя считать вполне удовлетворительными — слишком много узлов оказались узанными как V^* (почти две трети общего числа).

В данной задаче возможность переноса критериев сейсмичности из одного региона в другой представляет не только прагматический интерес. Поскольку ограниченность материала обучения по Средней Азии не позволила провести вполне надежную оценку эффективности решающего правила, успешное использование критериев в другом регионе является еще одним тестом, подтверждающим работоспособность полученного набора признаков. В задачах сейсмического долгосрочного прогнозирования (и в других подобных задачах) никакой тест не является лишним, ибо на прямую оценку эффективности решающего правила потребуются десятилетия, а цена каждой ошибки велика. Аналогичным образом можно применить к Калифорнии признаки, найденные для Анатолии. Для этого необходимо лишь перенормировать значения параметров в соответствии с тем, какие значения они принимают в Калифорнии. Иными словами, необходимо изменить пороги дискретизации. Результаты распознавания следует признать удачными по следующим причинам.

1. Пересечения линеаментов в Калифорнии имеют много характерных признаков — среднее $(n_v + n_n) = 8$, вопреки тому, что эти признаки найдены для объектов Анатолии. Пересечения ясно делятся по результатам голосования на две группы так, что распознавание устойчиво относительно порога Δ .

2. Вблизи каждого эпицентра имеется пересечение, распознанное как В при $\bar{\Delta} = 0$.

3. Распознаются как В все пересечения, отнесенные к В в основном варианте распознавания, причем это нельзя объяснить просто большим числом ложных тревог, поскольку много пересечений все же распознается как Н.

Проделаем теперь обратную процедуру: применим к Анатолии характерные признаки, найденные для Калифорнии, изменив снова пороги дискретизации параметров. Были получены аналогичные результаты. Пересечения ясно разделены по результатам голосования. При $\bar{\Delta} = 0$ распознаются пересечения

вблизи каждого известного эпицентра, исключая один. Области В хорошо согласуются с областями, найденными при обучении по данным Анатолии. Возможность перенесения критериев высокой сейсмичности с Анатолии на Калифорнию и обратно кажется естественной: землетрясения Анатолии и Калифорнии связаны с крупным сдвигом — Большим Анатолийским разломом. Но малое (один) число пропусков цели и хорошее согласие результатов при обучении на разных регионах неожиданны и заслуживают дальнейшей интерпретации. Для Сьерра-Невады и Провинции впадин и хребтов критерии Анатолии оказались непригодны: в окрестности двух из четырех эпицентров ни одно пересечение не распознано.

Конечно, используя признаки, полученные в одних условиях, нельзя получить столь же высокого уровня распознавания на других объектах. Тем не менее опыт, приобретенный при решении одной задачи в виде набора признаков, оказывается полезным в других задачах, особенно на первых порах, когда недостаточно материала для собственного обучения, или в тех случаях, когда материал обучения вообще невозможно увеличить.

Возможно даже, что во всех случаях набор признаков для распознавания должен состоять из двух частей: 1) постоянной для широкого круга условий (фундаментальное знание), 2) переменной, которая образуется на каждом месторождении путем доучивания на местном материале (конкретное знание).

Перенос моделей. Переходя из одного региона в другой с какой-либо геологической задачей, мы несем с собой не только опыт, заключенный в полученном решающем правиле. Прежде всего мы несем с собой опыт удачного (или неудачного) решения задачи. Вряд ли нужно доказывать, что успешное решение задачи распознавания — хороший стимул для опробования этого метода в отложениях другого типа или в других геологических условиях, или на месторождениях других полезных ископаемых и т. д. Собственно, так и развивались работы по распознаванию в геологии и геофизике. Вначале — разделение водоносных и нефтеносных пластов в песчаниках, затем в карбонатах, затем построение прогнозной карты на месторождении ртути, затем на нефтяных и газовых месторождениях, месторождениях золота, меди, урана и т. д. Ясно и то, что неудача на первом этапе могла затормозить этот процесс. Психологическая настроенность — очень мощный фактор научного исследования. Поэтому, обсуждая проблему переноса опыта из одного региона в другой, мы не должны забывать о роли психологического фактора.

Кроме психологического опыта мы обладаем также и более конкретными знаниями, которые можем использовать, а именно моделью объекта. Модель объекта определяет исключительно важный аспект распознавания — описание объекта, т. е. пространство параметров. Далее модель определяет (качественно)

связи между параметрами и целевой функцией. При каротаже — это связь геофизических параметров пласта с нефтеносностью (или литологией). В сейсмологических задачах — это связь геоморфологических признаков с сейсмичностью, а в задачах прогнозирования рудоносности — это связи между геологическими характеристиками и концентрацией руды. Самое важное то, что эта априорная информация, складываясь с информацией, содержащейся в материале обучения, позволяет частично скомпенсировать недостаток информации, связанный с малым объемом обучающей выборки (ситуация столь частая в геологических задачах). Однако в некоторых случаях эта информация вступает в противоречие с информацией, содержащейся в материале обучения. Например, при решении задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на Балканах для описания объектов (дизъюнктивных узлов) была использована модель, успешно опробованная в Средней Азии: параметры должны отображать раздробленность и размах высот в дизъюнктивных узлах. Однако собранный по Балканам материал показал, что вся территория Балкан очень сильно раздроблена и поэтому характеристики раздробленности не могут служить различительными признаками для выделения сейсмоопасных мест.

Другого рода конфликт между моделью, привнесенной из другого региона, и конкретным материалом, собранным в данном регионе, произошел при решении аналогичной задачи для региона Эгейского моря [20]. Оказалось, что для ряда характеристик морфоструктурных узлов связь их с сейсмичностью носит обратный характер (по сравнению со связью, выявленной в районе Средней Азии). Например, значения r_1 , r_3 , r_4 , r_5 , n_2 (см. табл. 6) были велики в сейсмичных узлах, в то время как в Средней Азии сейсмичные узлы характеризовались низкими значениями этих параметров. Причем эти характеристики сами по себе обладали неплохой информативностью и по формальным признакам должны были бы быть использованы в распознавании. В такой ситуации были проведены два варианта обучения — с участием этих признаков и без них, заменив их другими параметрами, не противоречащими принятой модели. Решающее правило, включавшее «противоречивые» параметры, показало себя неудовлетворительно с разных точек зрения: небольшой в среднем перевес голосов, отрицательный результат эксперимента «сейсмическая история» (заблаговременно предсказано лишь одно землетрясение 1960 г.). Без «противоречивых» характеристик распознавание оказалось вполне успешным. Эксперимент «сейсмическая история» не дает пропусков цели при отступлении в прошлое до 1911 г., когда было известно лишь семь эпицентров. Иными словами, начиная с 1911 г., действуя по описанной методике распознавания, мы могли бы заблаговременно распознать места возникновения восьми последующих землетрясений.

Распознавание ситуаций. Выше отмечалось, что попытка использования признаков, полученных при обучении на пластах Ромашкинского месторождения, для выделения нефтеносных пластов на разведочных площадях не увенчалась успехом. Для успешного решения задачи в условиях разведочных площадей пришлось обучить программу на пластах из этих районов.

В результате появились два различных набора признаков для выделения нефтеносных пластов по двух регионам — Ромашкинскому месторождению и разведочным площадям Татарии.

Теперь уже на новой площади можно использовать признаки, пригодные для одного из этих двух районов. Но встает вопрос: признаками какого района воспользоваться, чтобы получить наилучший результат? Иначе говоря, необходимо выяснить, на коллекторы какой площади из уже изученных больше всего похожи пласты-коллекторы новой площади. Для решения этой задачи в первую очередь нужно знать, чем отличаются коллекторы уже изученных районов. Однако установить различия в коллекторах Ромашкинского месторождения и разведочных площадей Татарии по физическим характеристикам не удастся, так как все измеряемые в настоящее время физические свойства пластов не имеют каких-либо существенных различий в этих районах. Именно поэтому и геологи, и геофизики считают коллекторы этих районов однотипными.

Можно попытаться решить эту задачу с помощью программы распознавания по комплексу геофизических данных, т. е. научиться отличать друг от друга пласты различных площадей, а фактически — типы коллекторов. Можно было надеяться, что задача эта будет успешно решена, так как кривые распределения некоторых параметров для коллекторов различных районов имеют небольшую зону перекрытия. В данной задаче I класс образуют пласты (как нефтеносные, так и водоносные) одного района, а II класс — пласты другого района. В процессе обучения программа выявляет признаки, которыми характеризуются коллекторы этих районов. Если теперь предъявить ей пласты новой площади, то, используя полученные признаки, она отнесет их к I или II классу, т. е. определит, к коллекторам какого из этих районов ближе пласты новой площади. В дальнейшем для интерпретации материалов новой площади с целью выделения продуктивных пластов, по-видимому, целесообразно использовать признаки нефтеносности именно этого района.

Для решения задачи был использован комплекс из тех же геофизических параметров, который применялся при выделении продуктивных горизонтов. Интервалы разбиения параметров были изменены в соответствии с теми требованиями, которые изложены выше.

Обучение программы проводилось по 27 пластам, в которые вошли и нефтеносные, и водоносные пласты того и другого

районов (I класс был представлен пластами Ромашкинского месторождения; II класс — пластами разведочных площадей Татарии).

В процессе обучения программа выявила признаки, отличающие коллекторы этих районов. При экзамене программа разделила коллекторы этих районов с эффективностью 80 %. Затем программе предъявили нефтеносные и водоносные пласты новой площади — Бугульминской (Татарская АССР). В 85 % случаев пласты этой площади были отнесены к I классу, т. е. к коллекторам Ромашкинского месторождения. Это означает, что для интерпретации материалов этой площади нужно воспользоваться признаками, полученными при обучении программы на материалах Ромашкинского месторождения. При распознавании 24 пластов Бугульминской площади по этим признакам программа сделала две ошибки, т. е. эффективность ее работы составила 92 %.

Представить, как действует человек в подобных ситуациях, довольно просто. При интерпретации материалов еще не изученного района он пользуется критериями, выработанными при изучении геологических и геофизических данных старых изученных районов. В случае, если используемые критерии оправдывают себя, то поведение интерпретатора не меняется. В противном случае, когда заключения геофизиков не подтверждаются объективными данными (результатами опробования скважин), необходимо изменить критерии или методы интерпретации. И человек действительно их меняет по мере накопления опыта работы на данном месторождении, т. е. другими словами, по мере накопления фактического материала и его анализа.

Очевидно, что поведение машины в такой ситуации должно быть аналогичным. На первом этапе используются признаки, выработанные в других, но наиболее близких условиях; по мере накопления фактического материала (выявленных ошибок) должно происходить переучивание. Для этого необходимо в обучающую последовательность включать пласты, ошибочно проинтерпретированные. Основная проблема, которая при этом возникает, — определение оптимального объема обучающей последовательности. Если объем ее будет очень велик, то программа чрезвычайно медленно переучивается. Может оказаться, что к тому времени, когда она выработает новую систему признаков, фонд пластов, который необходимо проинтерпретировать, будет уже исчерпан. С другой стороны, при малом объеме обучения программа будет быстро перестраивать систему признаков, но эффективность этой системы признаков будет невысока. Выбор оптимального объема обучения (объема памяти) — сложная задача, которую предстоит еще решать. Некоторые идеи смогут, очевидно, быть позаимствованы из области игр автоматов.

§ 3. ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ПОДХОД

Рассмотренная выше задача есть задача выбора стратегии и поэтому имеет множество аналогов в различных областях науки и техники. В рассмотренном случае оказалось, что существуют две стратегии (два набора распознающих признаков) и задача состоит в выборе одной из них (что называется в теории игр чистой стратегией). Однако в данной задаче может быть использована смешанная стратегия. В теории игр смешанная стратегия заключается в случайном выборе одной из стратегий с вероятностями q и $1 - q$ соответственно. В данном же случае можно отказаться от случайного выбора стратегий, а выбирать стратегии на основе доступной информации. Информация о том, какую выбрать стратегию, содержится в описании самого объекта исследования, в нашем случае пласта. Иными словами, вопрос о выборе той или иной стратегии в каждом случае решается индивидуально. Таким образом, мы пришли к вопросу о роли индивидуального подхода в проблеме исследования объектов.

Обычно термин «индивидуальный подход» используется в социальных науках, в первую очередь в педагогике. Этот термин не отражает конструктивной системы действий (например, воспитательных мероприятий). По существу, он означает лишь запрет на использование стандартных методов. Он говорит о том, как не надо делать, но ничего не говорит о том, как надо поступать. На примерах великих педагогов и замечательных врачей можно показать, как нестандартно они действовали (в прошлом!) в различных ситуациях. Индивидуальный подход в наше время весьма животрепещущая проблема медицины. Суть его отражается в афоризме: «Надо лечить больного, а не болезнь». «Лечение болезни» означает использование во всех случаях, т. е. для всех больных с определенным диагнозом, стандартного лечения, а «лечение больного» означает индивидуальный подход.

В геологии проблема индивидуального подхода имеет особую окраску. Можно даже сказать, что она несколько гипертрофирована. Принято считать большинство геологических объектов: а) очень сложными, б) обладающими неповторимыми индивидуальными особенностями. В соответствии с такой точкой зрения выдвигается требование индивидуальной интерпретации геологических объектов. Геологическая литература хранит следы блестящих исследований различных геологических объектов выдающимися геологами. Однако такой подход противоречит основной тенденции науки, которая ищет в различном общем. В. Ю. Забродин замечает по этому поводу, что большая часть экспериментов ориентирована не на поиски закономерностей поведения вещества в геологических процессах, а на воспроизведение особенностей конкретных геологических объектов [20]. Он далее пишет, что огромное количество гипотез

есть следствие повсеместно распространенного убеждения, что объекты геологии сугубо индивидуальны и каждый из них заслуживает не только самостоятельного описания, но и самостоятельного объяснения. В итоге процесс познания нередко замыкается в порочный круг: представления о «неповторимой индивидуальности» объектов множат *ad hoc*-гипотезы (гипотезы на данный случай), а огромное количество последних якобы подтверждает представления о «неповторимой индивидуальности».

Если в каждом случае требуется изобретать новый метод, то нет места для обобщения, для использования накопленного опыта. Разумной выглядит ситуация, когда имеется некоторое число стратегий (например, методов исследования или решающих правил) и в каждом конкретном случае необходимо обоснованно выбрать одну из них.

Соответственно в рассмотренной задаче распознавания нефтеносных пластов при переходе на новую площадь более разумным представляется индивидуальный подход: вначале решается, к какому типу коллектора принадлежит данный пласт, а затем используется соответствующее решающее правило. Такой же подход разумно использовать в медицинских задачах: вместо того чтобы выяснить с помощью статистических методов, какой препарат или метод лечения предпочтительнее, необходимо для каждого больного решать, какой из двух (или из m) методов разумнее использовать в данном случае. Именно так обстояло дело в медицине с задачей о выборе тактики лечения геморрагических инсультов [6]. Первоначально встала проблема сравнительной оценки эффективности двух методов лечения: консервативного (медикаментозного) и хирургического (удаление кровяного сгустка из мозга). Однако затем была поставлена и решена задача индивидуального выбора тактики лечения. Для этого были решены две задачи распознавания: 1) каков будет исход заболевания при консервативном методе лечения, 2) каков будет исход заболевания при хирургическом методе лечения. Имея в руках два таких прогноза (эффективность их составила 90 %), врач мог принять обоснованное решение о выборе тактики лечения (в данном контексте каждая из тактик лечения представляла одну из стратегий по терминологии игр). Решающие правила были получены с помощью программы «Кора-3», а решение задач основывалось на методах, разработанных при решении геологических задач распознавания.

Существуют и другие аспекты индивидуального подхода в задачах распознавания. Один из них был предложен П. А. Куниным (1975 г.) и носит чисто алгоритмический характер. Он базируется на программе распознавания «Кора-3». Решающее правило, реализованное в этом алгоритме, имеет специфическую особенность: оно является случайным представителем множества эквивалентных решающих правил. Это связано

с тем, что в процедуре отбора признаков из множества эквивалентных признаков выбирается один — первый встреченный при переборе. Замена одного признака на другой, эквивалентный ему, никак не изменяет результатов распознавания объектов, представленных в обучении, но может изменить результаты распознавания на других объектах. Например, данный объект не содержит признака, входящего в решающее правило, но содержит признак, ему эквивалентный, который в решающее правило не вошел. Это может изменить результаты распознавания. Поэтому было предложено формировать решающее правило для каждого вновь поступающего объекта при фиксированном материале обучения. При этом в решающее правило отбираются только те признаки, которые имеются у объекта, предъявленного для распознавания. Таким образом, каждый раз выбирается решающее правило (из множества эквивалентных), наиболее соответствующее объекту распознавания.

Другой подход был предложен Ю. А. Ворониным и получил свое развитие в работе [17], посвященной медицинской диагностике (еще одна иллюстрация теоретической и практической взаимосвязи геологических и медицинских задач распознавания).

В клиническом исследовании чаще всего ставится задача выявления своеобразия клинической картины заболевания для отличия его от подобных заболеваний. При этом с диагностической целью в настоящее время иногда используют наряду с симптомами, характеризующими реакцию организма на заболевание, также некоторые внутренние (возраст, пол, конституция, сопутствующие заболевания и т. д.) и внешние (географические, социальные и другие факторы внешней среды) эпидемиологические признаки. Попытки применения эпидемиологических признаков непосредственно для диагностики основаны на иногда выявляемых различиях значимости их при диагностируемых заболеваниях. Однако целесообразность их для этой и только для этой цели нельзя считать доказанной.

По аналогии с опытом применения внутренних факторов для группирования больных в эпидемиологии неинфекционных заболеваний, по-видимому, имеет смысл использовать эпидемиологические признаки для той же цели и при диагностике заболеваний. Основанием для такого подхода, названного индивидуальным (в отличие от бюрократического, при котором не проводится группирование), является предположение о важном изучении клинических проявлений заболеваний не столько на большей совокупности больных, сколько на максимально однородной совокупности их¹.

Специальный анализ показал целесообразность деления признаков описания больных при индивидуальном подходе

¹ По мнению автора этой работы, группа считается однородной, если объекты разных образов компактны и хорошо разделяются.

к диагностике на диагностирующие и группирующие. Диагностирующие признаки характеризуют реакцию организма на заболевание и используются для распознавания заболевания. Группирующие признаки отражают индивидуальные особенности больного в период, когда он был здоровым (внутренние эпидемиологические факторы), и используются для целенаправленной организации групп больных. Возможно, что к группирующим относятся также признаки, характеризующие условия жизни, в том числе и те, которые могут вызвать срыв компенсации и начало заболевания (внешние эпидемиологические факторы).

Основой индивидуального подхода в диагностике является правильная организация групп больных. Организацию групп можно проводить двумя способами: 1) по исходному экспериментальному материалу, предварительно зафиксировав число и порядок группирующих признаков; 2) по объекту распознавания. При первом способе из-за обычного в практических задачах недостатка экспериментального материала часть групп оказывается пустой или с недостаточным для дальнейших исследований числом больных. Такие группы не выделяются в отдельные, а все исследования для объектов (больных) экзамена проводятся на группе, образованной соответственно по меньшему числу группирующих признаков. Предварительно для каждой организованной таким образом группы выбираются информативная совокупность свойств и оптимальное решающее правило. Для объекта экзамена (больного, которому необходимо поставить диагноз) из организованных групп по совпадению значений группирующих признаков выбирается своя группа и в дальнейшем задача сводится только к постановке диагноза. Таким образом, данный способ организации групп обеспечивает оперативную диагностику и позволяет использовать автоматический режим постановки диагноза. Второй способ организации групп основан на проведении необходимых исследований, связанных с формированием группы, непосредственно при поступлении больного, а не заранее, как при предыдущем способе. В отличие от первого, здесь имеется возможность более гибкой реализации группы, т. е. выбором группы можно распоряжаться, меняя характер и порядок группирующих признаков. Таким образом, второй способ требует больших затрат времени в период, когда необходимо принимать решение, и не может использоваться при быстром прогрессировании болезни, хотя имеет преимущество в точности.

Не удивительно, что сама идея индивидуального подхода в распознавании и практическая ее реализация родились в медицинских приложениях, ибо гуманистическая направленность медицины и ее направленность на каждого отдельного индивидуума имеют тысячелетние традиции. Как только такой подход был реализован в виде формальных процедур (типа описанных выше), значение его стало ясным и для других областей прило-

жения методов распознавания образов, и в первую очередь для геологии.

Ведь, по существу, мы уже использовали этот принцип предварительного группирования, однако на уровне здравого смысла. Рассматривая задачу распознавания нефтеносных и водоносных пластов, мы стремились создать однородные группы объектов для распознавания. Естественно было отдельно рассматривать песчаники и известняки, пласты большой и малой мощности, песчаники разного возраста (например, девона и карбона), пласты, принадлежащие разным территориям. Все это — типичные группирующие признаки, позволяющие сделать материал обучения и экзамена более однородным, облегчающие достижение конечной цели — разделение нефтеносных и водоносных пластов (хотя сами эти признаки, как правило, не несут никакой информации о нефтеносности пластов). Теперь, после формализации признака предварительного группирования, его можно использовать как регулярный инструмент исследования при решении задач с помощью программ распознавания образов.

Использование группирующих признаков — это использование априорных знаний о наиболее общих свойствах объектов, поскольку в основе группирующих признаков лежит классификация объектов по возрасту, литологии, условиям образования, структурному положению и тому подобным фундаментальным геологическим факторам.

Глава VI

КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН

В последние два десятилетия проблема корреляции разрезов вызывает повышенный интерес. Причина повышенного интереса к этой проблеме в том, что попытка формализации геологических понятий и геологических построений, предпринятая в 60-х годах Ю. А. Косыгиным, Ю. А. Ворониным, Э. А. Егановым и другими, натолкнулась в этом вопросе (впрочем, как и во многих других) на большие трудности. Оказалось, что руководства по корреляции являются неполными и часто внутренне противоречивыми. Они не могли служить основой для конструктивной практической работы по корреляции разрезов. В то же время эта работа фактически проводилась в огромных масштабах и достаточно успешно. Следовательно, она имела разумные основания и включала в себя разумно работающие алгоритмы. Задача состояла в том, чтобы проанализировать этот род неформальной деятельности геологов, выявить ее логические основания, алгоритмы обработки данных, ограничения и критерии качества. Успешно работает в этом направлении

Ю. С. Салин. Его книга [32] выделяется в геологической литературе как с точки зрения уровня методологии научного исследования, так и по своей блестящей литературной форме (это не означает, однако, что со всеми утверждениями автора можно согласиться). Мы в дальнейшем изложении будем часто возвращаться к ней.

Книга Ю. А. Косыгина «Тектоника» [23] была выбрана нами в качестве отправной точки при обсуждении некоторых тектонических моделей, связанных с алгоритмами корреляции разрезов. Книга эта ближе всего по духу и методу к проблемам, обсуждаемым в этой работе, ибо автор стремится к логическому анализу теорий, моделей и понятий, используемых в геологии.

Нельзя признать случайным, что интерес к проблемам формализации в геологии вообще (и к задаче корреляции разрезов в частности) возник параллельно с внедрением ЭВМ в геологическую науку и практику. Во-первых, использование ЭВМ привлекло в геологию большое количество математиков с их профессиональным стремлением к формализации. Во-вторых, задача автоматизации обработки геологических данных требовала ее формализации и выражения на языке алгоритмов. В частности, благоприятная ситуация возникла в области промысловой геофизики: результаты геофизических исследований скважин полностью представимы в числовой форме, эти данные носят массовый характер, они в большей степени стандартизованы (а следовательно, сопоставимы), интенсивно разрабатывается аппаратура для цифровой записи этих данных и ввода в ЭВМ, разрабатываются и применяются алгоритмы для обработки и интерпретации этих данных (расчленение разреза, выделение пластов, определение их литологии, пористости, характера насыщающего флюида).

Естественно стремление продолжить работы по автоматизации обработки каротажных кривых с целью автоматизации корреляции разрезов скважин. Именно эта задача и является практической целью, для которой разрабатывался комплекс алгоритмов, который будет описан в данной главе. Такая задача накладывает определенные ограничения на обсуждаемый круг вопросов. В частности, не будут обсуждаться методы стратиграфической корреляции по данным ископаемой фауны и флоры, методы синхронизации разрезов по данным анализа радиоактивных изотопов, корреляция разрезов по данным химического, минералогического и литологического анализов кернов. Будет показано, что методы, используемые для корреляции по каротажным кривым, могут быть успешно применены при решении задач стратиграфической корреляции по другим исходным данным.

Предисловие Ю. А. Косыгина к монографии [32], посвященной корреляции разрезов, начинается с вопроса: «Зачем писать целую монографию по такому незначительному вопросу?». От-

ветом на этот риторический вопрос служит утверждение, что корреляция — это азбука геологии, что фундаментальные объекты, которыми геология оперирует (пласты, свиты, складки и т. п.), являются результатом корреляционных построений, что корреляционные понятия входят неотъемлемым элементом в любые геологические описания, реконструкции, выводы, теории. Но сама постановка вопроса показывает, что в геологической науке эта проблема обходилась стороной.

В чем причина такого невнимания к столь фундаментальной проблеме? Можно высказать несколько предположений. Первое состоит в том, что для оценки корреляционных построений нет хороших критериев, поэтому могут существовать одновременно и на равных правах несколько корреляционных схем, построенных на одном исходном материале. Результаты неправильных построений могут проявиться лишь через много лет (а могут и не проявиться). Как проявляются такого рода ошибки? Они проявляются посредством накопления внешних (относительно исходного материала) данных: более густая сетка скважин, делающая корреляцию очевидной; результаты эксплуатации нефтяного месторождения или подземного газохранилища; нахождение в керне специфицирующих окаменелостей. Оценка качества геологических построений на основе внешних критериев отражает господствующий взгляд на геологические объекты как на уникальные и исключительно сложно устроенные. При таком взгляде трудно ориентироваться на поиск внутренних критериев качества решения задачи — ясных закономерностей, проявляющихся в исходном материале. Как будет показано ниже (при анализе проблем расчленения разреза и предсказания землетрясений), такие внутренние критерии нередко существуют. Нельзя дать рецепты обнаружения этих внутренних закономерностей, однако если наука не ориентирована на существование простых фундаментальных законов, то их открытие существенно затруднено.

Аналогичную точку зрения высказывает Ю. С. Салин: «Причина почти полного отсутствия знания о структурных закономерностях слоистых толщ заключается в неправильном отношении к сложности реальных природных объектов. В современной геологии почти общепринята следующая философская посылка: чем сложнее объект, тем более необходимы при его изучении методы, позволяющие исследовать его во всем многообразии, — стохастический, факторный, многомерный, системный анализ. Приемлема скорее противоположная посылка: чем сложнее объект, тем более необходимы при его изучении упрощение, схематизация, идеализация. К реальному объекту во всем его многообразии подходят методом последовательного приближения — вначале строят простейшую модель, затем ее постепенно усложняют. При этом исходная модель должна представлять скорее карикатуру на объект, чем его всестороннее отображение» [32].

Еще на одну причину того, что закономерности внутреннего строения слоистых толщ остаются до сих пор несформулированными, указывает Ю. С. Салин. В теоретической геологии уже долгое время (со времен Лайеля) господствуют историко-генетические построения. Любые негенетические исследования почитаются за что-то второсортное; в лучшем случае структурные построения рассматриваются как подготовка исходного материала для настоящей науки. Ю. А. Косыгин по этому поводу говорит, что только «высшие» эволюционные, генетические построения удостоиваются титула теоретических; статические структурные результаты расцениваются в лучшем случае как сырье для настоящей науки, низводят их до уровня техники дела. К вопросу об оценке генетических теорий мы еще вернемся.

В дальнейшем мы будем говорить о литологической корреляции, имея в виду характер исходных данных — сведения, отражающие литологический состав пластов и положение границ между ними. При литологической корреляции возможно установление: 1) в разрезах различных скважин интервалов, принадлежащих сейчас (или принадлежавших некогда) одному и тому же геологическому телу; 2) точек в разрезах различных скважин, которые в процессе накопления осадков одновременно принадлежали поверхности осадконакопления (синхронных точек)¹. Во многих случаях решение одной задачи решает другую, однако это не всегда так. Подробный обзор алгоритмов литологической коррекции дан в работе [32].

§ 1. НЕФОРМАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ ЛИТОЛОГИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИИ

Приступая к созданию программ для корреляции каротажных диаграмм с помощью ЭВМ, естественно руководствоваться опытом геологов и геофизиков, практически занимающихся этой работой. При анализе такого рода неформальной деятельности наиболее тяжелая задача состоит в осознании и формулировке всех предположений, которые неявно принимаются и служат логическими основаниями работы.

Первое предположение, которое лежит в основе работы по литологической корреляции, — это принятие модели слоистого строения осадочной толщи. Ю. А. Салин (со ссылкой на Д. И. Соколова) называет это моделью «луковичных лепестков» (автором этой модели является А. Г. Вернер). Много нареканий в прошлом веке вызвало утверждение А. Г. Вернера, что слои тянутся непрерывно, обволакивая весь земной шар. Указывалось на очевидные факты, противоречащие этой формулировке: во-первых, невозможно проследить слои на очень больших расстояниях, во-вторых, даже на небольших расстояниях

¹ Такая постановка проблемы предложена Ю. А. Ворониным [11].

слои терпят разрывы (например, на разломах). Оба эти возражения кажутся несерьезными (по крайней мере, с сегодняшних позиций). Утверждение, что слои тянутся неограниченно далеко, означает лишь, что при всех структурных построениях их можно рассматривать как бесконечные — от этого предположения результаты корреляции пластов, построения структурных планов (в пределах геологических районов и площадей) не меняются. Но именно это утверждение указывает на истинно теоретический характер модели Вернера. В качестве аналогичного примера можно привести принимаемое в геометрии утверждение, что параллельные прямые пересекаются в бесконечности. Конечно, для нас естественнее предположить, что параллельные прямые нигде не пересекаются, однако все наши построения остаются неизменными при принятии любого из этих предположений.

Утверждение, что слои тянутся непрерывно, явно противоречит действительности (из-за наличия разломов и размывов), однако понимать его надо в том смысле, что при своем возникновении они были непрерывными (вспомним, что в формулировке Ю. А. Воронина речь идет об интервалах, принадлежащих сейчас или принадлежавших некогда одному и тому же геологическому телу). Это предположение и составляет базу для введения понятия разлома, ибо разлом — это разрыв непрерывности (разрыв того, что раньше было непрерывным).

С этой точки зрения представляется не совсем верным говорить, что вернеровская модель должна быть дополнена понятием разлома (в соответствии с наблюдаемыми фактами). Понятие разлома является производным от принятой модели слоистости. Нельзя было бы ввести такое понятие (а соответственно и выделить его в натуре), если бы не явное или неявное предположение, что все слои были непрерывны.

Другими словами, нельзя увидеть разлома, если не сделано предположения о том, что слои были непрерывны, т. е. не построив некоторой теории. По этому вопросу и по многим аналогичным (о существовании естественных границ, естественных геологических тел и т. п.) не раз разгорались дискуссии. Сторонники существования естественных границ и тел утверждают, что разлом или пачку, или пласт мы видим, не прибегая ни к каким теоретическим построениям. В качестве доказательства приводят утверждение, что любой неспециалист (т. е. не обладающий знаниями в области геологии) также увидит этот разлом или пласт. Сторонники другой точки зрения утверждают, что границы и тела, которые выделяет геолог, являются всегда конкретизацией идеального теоретического понятия. Если в арсенале геолога нет такого понятия, то он не может выделить соответствующий объект на реальном обнажении или на геологической схеме. «Мыслительная конструкция, модель, именуемая в практике конкретно-научных исследований «точкой

зрения», «мнением» и т. п., и служит тем эталоном, проектом, в соответствии с которым оконтуриваются, вычленяются по тем или иным признакам фрагменты реальности, превращенные в «зоны», «пласты», «массивы», «формации», «месторождения» и прочие геологические объекты» [19].

Эти точки зрения в действительности не так непримиримы, как кажется. Чтобы разобраться в этой проблеме, необходимо обратиться к некоторым положениям психологии зрительного восприятия. Этот экскурс в психологию не является отходом от проблемы анализа геологических и геофизических данных, которой посвящена эта книга. Подавляющая часть информации, которую обрабатывают геологи, представлена в виде зрительной информации (карты, кривые, профили, схемы, обнажения). Восприятие информации не есть перенос изображения на фотопленку. Восприятие есть всегда обработка информации. Поэтому, если мы стремимся понять алгоритмы решения различных задач геологии, нужно принять во внимание и этот первый этап обработки исходных данных.

В психологии восприятия существует принцип имитации. Поясним его сущность на примерах.

Известна задача автоматического чтения текста. Решение этой задачи для печатного текста не встретило принципиальных трудностей, и в настоящее время существуют машины, выполняющие эту работу с высокой степенью надежности (при некоторых ограничениях). Однако попытки на тех же принципах реализовать программы для чтения рукописного текста оказались неудачными. Выяснилось, что с точки зрения восприятия — это задачи сугубо различные. Восприятие печатных букв основывается на геометрических и топологических признаках, а восприятие рукописных букв носит совсем иную природу. Восприятие рукописных букв происходит через восприятие траектории движения пера, т. е. человек по неподвижному изображению восстанавливает, имитирует движение, которое породило это изображение. В этом нетрудно убедиться, ибо каждый, глядя на рукописный текст, может указать, где начиналось движение пера, в каком направлении оно двигалось и где оно проносилось по воздуху. Следовательно, образом рукописной буквы является не идеальная картинка, а движение, динамический стереотип. Таким образом, способ восприятия рукописного текста заключается в имитации устройства, генерировавшего это изображение.

Степень неразборчивости почерка определяется в значительной мере тем, насколько правильно пишущий приучен писать буквы. Правильно в данном случае означает написание их с определенного места и проведение траектории в определенном направлении. Для примера рассмотрим рис. 15. В первом случае (рис. 15, *a*) буква *c* начинается сверху, буква *a* начинается в правом верхнем углу. Несмотря на присутствие лишней линии (соединительной), слог читается совершенно свободно. Во

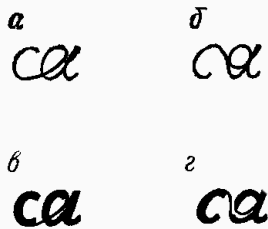


Рис. 15. Траектории письма

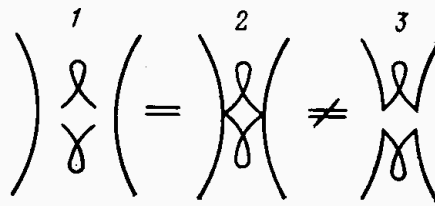


Рис. 16. Разложение изображений

втором случае (рис. 15, б) с начинается снизу, буква а — в левом нижнем углу. Как и в первом случае, присутствует соединительная линия. По рис. 15, б человек правильно воспроизводит траекторию движения пера при написании слога, однако эта траектория не идентифицируется с траекториями известных букв, и в результате чтения слога становится крайне затруднительным. А ведь в обоих случаях имеются полные геометрические образы букв с и а (рис. 15, в и г).

Другой пример, являясь классическим, иллюстрирует законы восприятия изображений. Один из законов целостного восприятия изображений, установленных гештальтпсихологией в начале века, носит название «принципа хорошего продолжения» [37]. Действие его иллюстрируется на следующих примерах (рис. 16).

В восприятии и описании фигуры (см. рис. 16, 2) человек как правило, не выделяет две буквы W (одна из них перевернута), а воспринимает ее как состоящую из двух скобок и ромба между ними. Почему это происходит? Потому что, воспринимая эту фигуру как воспроизведенную пером, человек восстанавливает способ ее возникновения, восстанавливает траекторию написания. Естественно, что он предполагает способ ее написания из элементов, представленных на рис. 16, 1 (две скобки и ромб). Проверить это утверждение нетрудно: нужно попросить любого человека воспроизвести рис. 16, 2.

Рассмотрим теперь пример, близкий к обсуждаемой проблеме выделения геологического разлома (рис. 17).

Как описывает человек этот рисунок? Он описывает его как систему параллельных линий, сдвинутых друг относительно друга по прямой линии. Более того, сама линия сдвига воспринимается как нечто реальное, как бы присутствующее на изображении. Иначе говоря, восприятие заключается в построении действий, которые привели

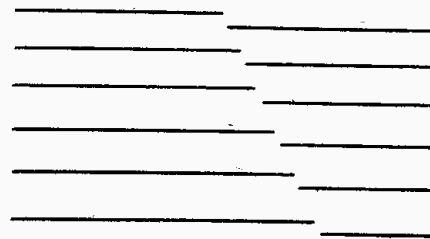


Рис. 17. Восприятие фиктивной границы

к появлению этого рисунка: сначала были нарисованы параллельные прямые, а затем они были сдвинуты по некоторой прямой. Конечно, эти линии могли быть нарисованы и многими другими способами, однако предложенная реконструкция удовлетворяет важнейшему принципу простоты.

Таким образом, в непосредственном, неискушенном восприятии этого рисунка строится своего рода теория его возникновения и в эту теорию как составная часть входит предположение о непрерывности линий в «прошлом». Однако вследствие нерасчлененности нашего восприятия и трудностей самоанализа, факт построения теории остается скрытым и для его обнаружения потребовались специальные психологические исследования.

Итак, не совсем правы сторонники существования «естественных» границ, которые имеются вне нас и не требуют для своего восприятия построения какой-либо теории. Оказывается, что теория все же существует и используется. Не совсем правы и те, которые утверждают, что без формулировки теоретических позиций нельзя выделить разлом. Оказывается, что эти теоретические построения не обязательно должны быть явно сформулированы — они существуют, но могут не осознаваться.

В наиболее общем виде принцип имитации был сформулирован М. М. Бонгардом [2]: всякая задача распознавания есть задача имитации распознающим автоматом другого автомата, который генерировал задачу распознавания.

Наконец, необходимо отметить, что теория, которую строит человек, воспринимая рис. 17, есть простенькая, но генетическая теория — теория происхождения наблюдаемой картины. Выше мы уже касались оценки статуса генетических теорий в геологии. Общепринятая точка зрения (которая долгое время господствовала, да и в настоящее время продолжает господствовать) состоит в том, что только эволюционные, генетические построения достойны титула теоретических. В последние два десятилетия подвергается критике сам генетический принцип построения геологических теорий.

Конечно, попытки установления господства какой-либо теории или класса теорий неприемлемы. Но точно так же неприемлемы попытки объявить какой-либо класс теорий недееспособными и вредными. Не может быть запретов на способ теоретических рассуждений. Вопрос лишь в степени обоснованности или предсказательной силе теории. Весь пафос ярых нападок на генетические модели и построения должен быть направлен на их необоснованность, а не на их исторический характер.

Проведенное выше рассмотрение показывает, что генетическая модель может быть исключительно мощным способом описания исходных данных. Это безусловно так для самых первых уровней восприятия и обработки зрительной информации. Мы с успехом используем такого рода модели и на более высоких уровнях, где требуется их сознательное и корректное построение. Весь вопрос только в качестве наших моделей.

Возвращаясь к основной теме этой главы (выяснению неформальных оснований корреляции разрезов), повторим, что первая гипотеза, которая лежит в основе корреляции, — это гипотеза о слоистости осадочной толщи. Принятие этой гипотезы означает принятие двух утверждений: 1) на каждой вертикали слои могут быть упорядочены, 2) при образовании слоев тянулись непрерывно. Это же можно выразить и другими словами: принятие вернеровской модели слоистого строения толщи означает, что эта толща может быть разбита на тела, для которых имеет смысл отношение «выше» (или «ниже») и оно может быть (или могло быть) установлено на любой вертикали.

§ 2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПЛАСТОВ

Только приняв модель слоистого строения осадочной толщи, можно ставить задачу литологической корреляции: идентификацию одного и того же пласта в различных скважинах. Очевидно также, что в идеальном случае слоистой среды без всяких нарушений задача корреляции решается тривиально: если в каждой из скважин пронумеровать пласты сверху вниз, то один и тот же пласт будет иметь во всех скважинах один и тот же номер. Таким образом, задача корреляции разрезов становится осмысленной только тогда, когда последовательность пластов в какой-либо скважине оказывается нарушенной вследствие выпадения пластов, размыва или разлома. В этом случае задача заключается в том, чтобы восстановить ту часть разреза, которая удовлетворяет гипотезе слоистости. Можно присоединиться к высказыванию Ю. С. Салина о том, что отношение вернеровской модели бесконечных слоев к реальным, осложняющим ее феноменам аналогично отношению закона инерции к таким искажающим идеальную картину движения феноменам, как трение [32]. Понятия, связанные с этими феноменами, могут возникнуть только после принятия основного закона и только в результате наблюдения отклонений от основного закона.

Как же производить идентификацию пластов в разрезах различных скважин? Если бы в нашем распоряжении находилась полная информация о составе, структуре и свойствах пласта, если бы можно было предположить, что каждый пласт обладает неповторимым сочетанием этих характеристик и характеристики эти неизменны на всей изучаемой территории, то не представляло бы труда определить положение одного и того же пласта в различных скважинах. Однако опыт говорит, что таких ситуаций практически не бывает и на них не приходится рассчитывать. Кроме того, мы рассматриваем задачу корреляции разрезов скважин по данным только каротажа. Конечно, каротажные кривые дают гораздо более бедную информацию, чем разносторонний керновый анализ. Дело в том, что основные геофизические методы исследования скважин отражают

в гораздо большей степени пористость пород, глинистость, структуру порового пространства, электрическое сопротивление насыщающего флюида, чем минералогический или химический состав пласта. Поэтому каротажные данные плохо отражают индивидуальность пласта и попытка прямой идентификации пластов по комплексу каротажных характеристик становится вовсе безнадёжной. Идея комплексного анализа каротажных кривых с использованием программы распознавания образов для корреляции была предложена в 1963 г., однако автор скоро от нее отказался. Конечно, решение поставленной задачи может быть несколько облегчено использованием априорной информации, содержащейся в слоистой модели: последовательность идентифицированных пластов в каждой скважине остается неизменной. Это положение было впервые сформулировано в явном виде и использовано для создания алгоритма корреляции разрезов Б. Еховским [45]. Однако этого ограничения оказывается недостаточно для разрешения задачи корреляции разрезов на пути прямой идентификации отдельных пластов.

Можно несколько ослабить требования к индивидуальности пластов. Если пласты разнести по m различным категориям, то можно было бы ожидать, что последовательность пластов окажется индивидуальной. Алгоритм, основанный на этом принципе, был предложен А. Е. Кулинковичем. Очевидны серьезные ограничения этого метода. Во-первых, степень индивидуализации последовательности пластов пропорциональна ее длине, т. е. надежно коррелируются длинные ненарушенные последовательности пластов. Во-вторых, надежность корреляции зависит от величины m (от разнообразия описания пластов). К сожалению, по каротажным данным трудно выделить много типов (> 5). Главное же ограничение на величину m содержится в самих разрезах. Если говорить о наиболее массовом каротажном материале, полученном на нефтяных и газовых месторождениях, то, как правило, разрезы содержат три-четыре литологических типа, а нередко громадные толщи являются или сплошь карбонатными, или песчано-глинистыми. Хотя карбонатные пласты сильно различаются по электрическому сопротивлению или показаниям нейтронного гамма-метода и на этом основании их можно разделить на подтипы, это не может быть использовано при корреляции, ибо эти геофизические характеристики определяются в основном пористостью и структурой порового пространства. Это такие характеристики, которые могут сильно меняться от скважины к скважине.

В рассмотренных выше методах корреляции использовались лишь свойства самих пластов и факт их упорядоченности в разрезе. Мощность пласта предполагалась изменяющейся по произвольному закону. Однако практика показывает, что в большинстве случаев мощности пластов не изменяются хаотически, а изменяются довольно медленно и часто регулярным образом. Поэтому в качестве индивидуальной характеристики некоторой

толщи можно использовать последовательность мощностей пластов, совершенно абстрагируясь от их литологических (или геофизических) характеристик. По сравнению с предыдущим способом этот способ имеет то преимущество, что вместо числа типов пластов здесь используется число различных мощностей пластов, а их в большинстве случаев немало (от одного до нескольких десятков метров). Это делает возможной индивидуализацию более коротких последовательностей, а следовательно, и более надежную корреляцию. Алгоритм, основанный на использовании последовательности мощностей, был предложен А. Б. Вистелиусом и М. А. Романовой. В этой работе они были в одном шаге от открытия законов перспективного соответствия разрезов скважин, ибо использовали гипотезу о линейном соотношении мощностей в отдельных интервалах разрезов различных скважин.

Если обратиться к опыту корреляции разрезов скважин по каротажным кривым, то можно убедиться, что на практике никогда не используется какая-либо одна из перечисленных выше стратегий (или свойства пластов, или мощности пластов). Обязательный элемент корреляции — сопоставление конфигураций каротажных кривых в некоторых интервалах. Конфигурация отрезков каротажных кривых есть огрубленное описание этого отрезка. Огрубление кривой заключается обычно в том, что она заменяется кусочно-постоянной кривой: значения геофизического параметра в каждом пласте заменяются средними по пласту значениями или теоретически вычисленными истинными значениями с учетом мощности пласта, экранирования, сопротивления промывочной жидкости и т. п.

Таким образом, в огрубленном описании участка кривой сохраняется информация и о мощности пластов, и об их свойствах и последовательности. Сопоставляя два участка каротажных кривых из двух скважин, мы устанавливаем сходство по совокупности этих характеристик. Естественно, что степень индивидуализации участка разреза при использовании такой комплексной характеристики будет выше, чем при использовании отдельных ее составляющих. Напомним, что такой метод корреляции использует предположение о слоистости осадочной толщи (сохранение упорядоченности пластов) и о слабом изменении мощности пластов.

Процедура сравнения конфигурации двух кривых легко может быть формализована. Пусть имеются две каротажные кривые, записанные в двух скважинах, разрезы которых мы хотим скоррелировать. Выделим на одной из каротажных кривых интервал длиной L и будем сравнивать его с произвольным участком длины L на другой каротажной кривой. Операция сравнения будет заключаться в вычислении меры сходства между ними.

Существуют различные критерии сходства двух кривых $f_1(x)$ и $f_2(x)$, заданных на отрезке (a, b) . Можно принять

за меру близости величину

$$\Delta = \int_a^b |f_1(x) - f_2(x)| dx$$

или

$$\Delta = \int_a^b [f_1(x) - f_2(x)]^2 dx.$$

В обоих случаях кривые считаются тем более схожими, чем меньше величина Δ . При $\Delta = 0$ непрерывные кривые $f_1(x)$ и $f_2(x)$ совпадают.

В качестве меры близости можно использовать и нормированное скалярное произведение

$$K = \frac{\int_a^b f_1(x) f_2(x) dx}{\|f_1(x)\| \|f_2(x)\|}, \quad (2.4)$$

где $\|f(x)\|$ — норма $f(x)$:

$$\|f(x)\|^2 = \int_a^b f^2(x) dx.$$

Скалярное произведение K тем ближе к единице, чем более схожи кривые $f_1(x)$ и $f_2(x)$.

Нужно отметить, что выражение (2.4) известно в теории связи как коэффициент взаимной корреляции двух кривых и используется для выделения сигнала известной формы на фоне помех. Чаще всего в качестве меры сходства двух кривых выбирается величина K . Нельзя утверждать, что данный критерий сходства кривых является хоть в каком-то смысле оптимальным, однако он оказался вполне приемлемым в пределах данной задачи.

Алгоритм сравнения двух участков кривых содержит очень важный параметр — длину интервала сравнения L . Выбор величины L определяется противоречивыми требованиями. С одной стороны, желательно выбирать L большим, ибо, чем длиннее интервалы сравнения двух кривых, тем меньше вероятность случайного совпадения конфигурации этих кривых. Вместе с тем сама по себе длина еще не все определяет. Многое зависит от расчлененности кривой, поэтому фактически существенна не длина L , а число пластов, приходящихся в среднем на длину L . Чем их больше, тем меньше вероятность случайного совпадения конфигураций кривых в различных скважинах.

Однако существуют факторы, которые делают желательным уменьшение величины L . Во-первых, в ситуациях, когда изменение мощностей от скважины к скважине велико. Тогда увеличение интервала сравнения кривых уменьшает K . Во-вторых,

чем больше L , тем больше неопределенности в фиксации места нарушения в разрезе.

На основании описанной процедуры выявления похожих участков на диаграммах можно следующим образом представить алгоритм корреляции. На одной диаграмме выделяется ряд участков (или вся диаграмма разбивается произвольным образом на участки определенной длины). Для каждого из выделенных участков на первой диаграмме вычисляется функция взаимной корреляции

$$K(\tau) = \int_a^b f_1(x) f_2^2(x - \tau) dx / \left(\int_a^b f_1^2(x) dx \int_a^b f_1^2(x - \tau) dx \right)^{1/2}.$$

(где τ — разность глубин между верхними границами участков) с различными участками на другой диаграмме. Значение относительной глубины τ , при котором $K(\tau)$ достигает абсолютного максимума, определяет положение сходного участка разреза во второй скважине.

Ясно, что лишь в особо благоприятных условиях корреляция может быть проведена с помощью описанного выше метода — по максимуму функции взаимной корреляции (рис. 18, а). При этом можно даже обнаружить появление новой части разреза (как это сделать, видно из рис. 18, б). Однако ситуация усложнится, если нужно обнаружить выпадение части разреза, т. е. если на рис. 18, б взять за исходную скв. 2. В этом случае, хотя для пласта p из скв. 2 нет аналога в скв. 1, функция взаимной корреляции все равно достигнет максимума против одного из

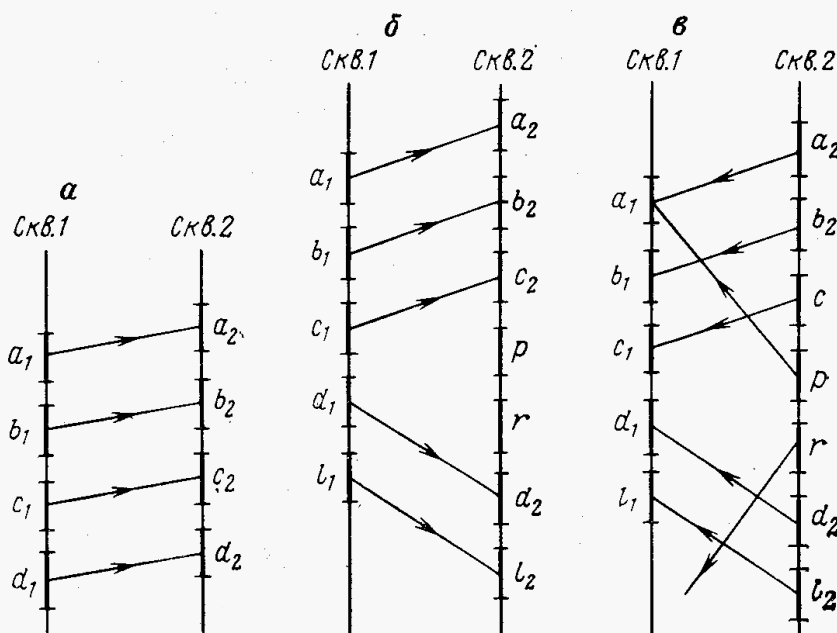


Рис. 18. Схемы корреляции разрезов скважин

пластов скв. 1. То же самое справедливо и относительно пласта r . В результате возникает ситуация, изображенная на рис. 18, в.

В условиях, близких к идеальным, можно правильно выбрать соответствующую пару пластов, используя то же правило — по максимуму K (τ). Однако ситуация примечательна тем, что любой геолог, даже не зная, для какой пары пластов коэффициент корреляции выше, глядя на рис. 19, правильно выберет вариант корреляции. Он это сделает на основании критерия упорядоченности. Упорядоченность в расположении взаимно коррелируемых пластов — следствие принятия модели слоистости осадочной толщи.

Способ использования условия упорядоченности в алгоритме корреляции был предложен Б. Еховским [45]. Заключается он в следующем. Расположим разрезы двух скважин по ортогональным осям h' и h'' (см. рис. 19). Отметим положение пластов в одной скважине на оси h' (h'_1, h'_2, h'_3, \dots) и положение тех же пластов в другой скважине на оси h'' ($h''_1, h''_2, h''_3, \dots$). Точки 1, 2, 3, ... с координатами соответственно $(h'_1, h''_1), (h'_2, h''_2), (h'_3, h''_3) \dots$ будем называть точками корреляции, а кривую, проходящую через эти точки, — корреляционной кривой. Утверждение, что корреляционная кривая должна быть монотонной, эквивалентно утверждению об упорядоченности коррелируемых пластов в скважинах.

Сочетание принципа упорядоченности с вычислением меры сходства (например, коэффициента корреляции) между участками двух каротажных диаграмм приводит к следующему алгоритму корреляции разрезов.

Строится прямоугольная координатная сетка. По одной оси откладываются глубины для одной из коррелируемых сква-

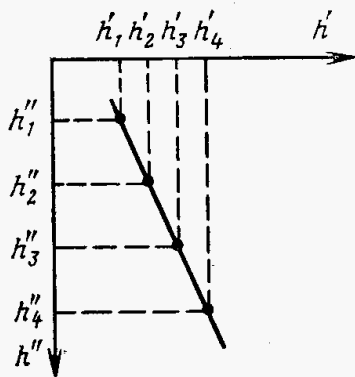


Рис. 19. Корреляционный график

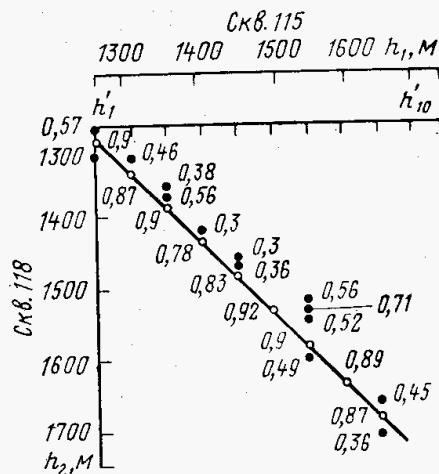


Рис. 20. Корреляционный график (площадь Могутово, Татарская АССР)

жин, по другой — для второй скважины. На одной оси отмечаются границы участков, выбранных для корреляции на первой диаграмме: h'_1, h'_2, h'_3 . Для каждого из этих участков вычисляются коэффициенты взаимной корреляции со всеми участками такой же длины на второй диаграмме, т. е. получают функцию $K(\tau, h'_i)$. Эта функция достигает локальных максимумов в некоторых точках $\tau'_1, \tau'_2, \tau'_3, \dots$, соответствующих глубинам $h''_i = h'_i + \tau_i$. Точки с координатами $(h'_1, h''_1), (h'_2, h''_2), \dots$ наносятся на координатную сетку, и возле каждой из них указывается коэффициент корреляции, полученный в данной точке. Аналогичные построения производят на втором участке, выбранном для корреляции на первой диаграмме, на третьем и т. д. В результате получается картина, представленная на рис. 20. В самых благоприятных для корреляции случаях (о которых шла речь выше) точки на этом графике, соответствующие максимальным в каждом ряду коэффициентам корреляции, будут укладываться на кривую, идущую примерно под углом 45° (мы не уточняем пока понятия «кривая», так как далее будем обсуждать этот вопрос подробно).

В случае выпадения из разреза пачки пластов получим график другого вида (рис. 21), на котором место несогласия определяется разрывом корреляционной кривой. Такие корреляционные графики могут помочь в проведении правильной корреляции и в более сложных ситуациях, например когда максимум $K(\tau)$ достигается не против соответствующего пласта в другой скважине, а совершенно на другом интервале (выше обсуждалась возможность такой ситуации). В точке же истинной корреляции функция $K(\tau)$ достигает лишь локального максимума, как это видно на рис. 22. Ясно, что в этом случае невозможно провести плавную кривую через все максимумы. Плавная кривая может быть проведена лишь в случае, если игнорировать точку $K_{\max}=0,91$, а принять во внимание локальный максимум ($K=0,66$).

Практика корреляции разрезов скважин показывает, что принцип упорядоченности состоит не только в том, что порядок следования коррелируемых пластов в различных скважинах одинаков. В очень редких случаях наблюдается такая картина, когда один пласт увеличивается в мощности, соседний с ним уменьшается, затем один пласт пропадает и т. д. В действительности на практике исходят из гипотезы (которая, как правило, подтверждается), что целые пачки пластов имеют общую тенденцию или к увеличению мощности, или к уменьшению мощности, или к сохранению мощности (именно поэтому выше шла речь о проведении плавных корреляционных кривых). Как выяснилось, это предложение в ряде случаев может быть усилено и выражено в математической форме.

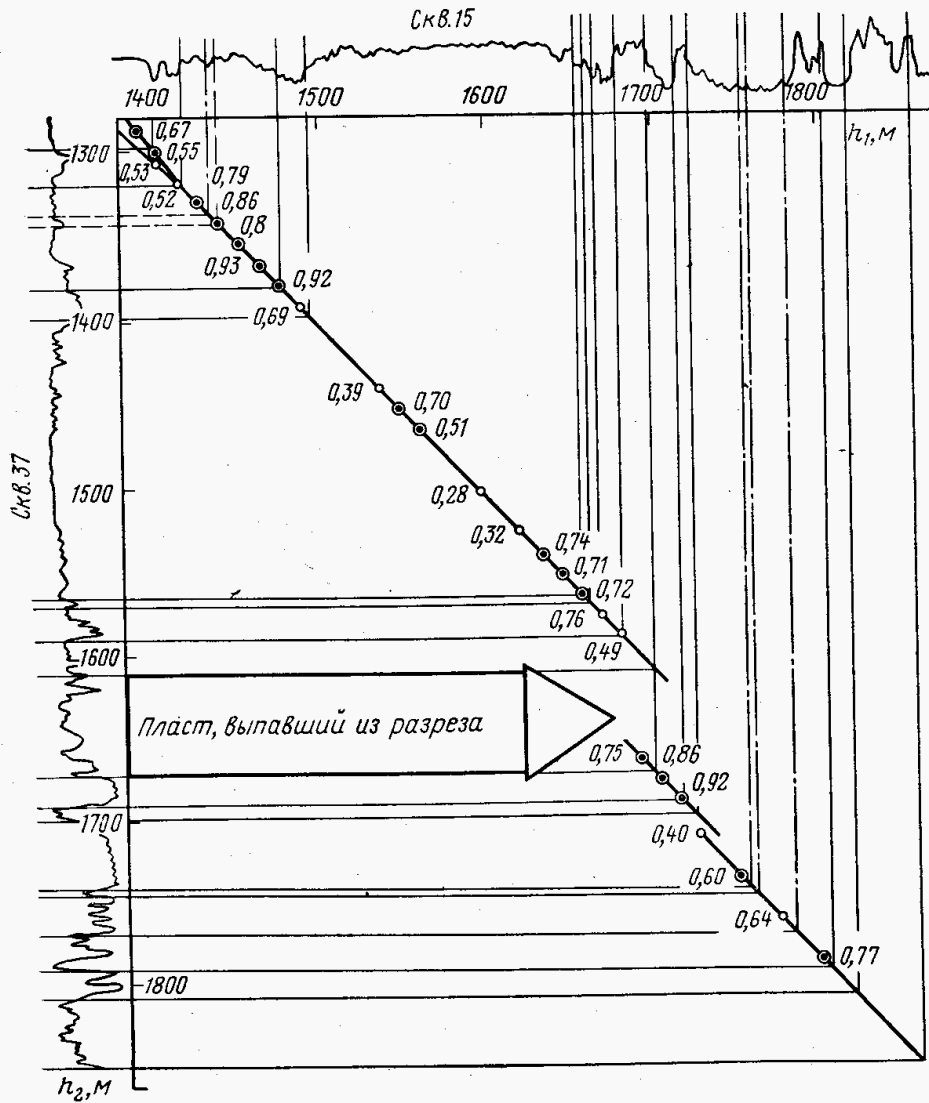


Рис. 21. Корреляционный график (площадь Учкыр, УзССР)

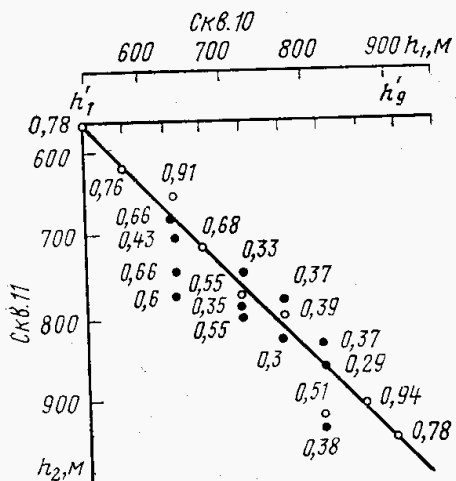


Рис. 22. Корреляционный график (площадь Газли, УзССР)

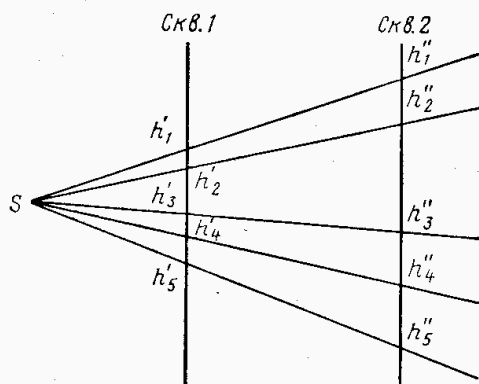


Рис. 23. Модель перспективной корреляции

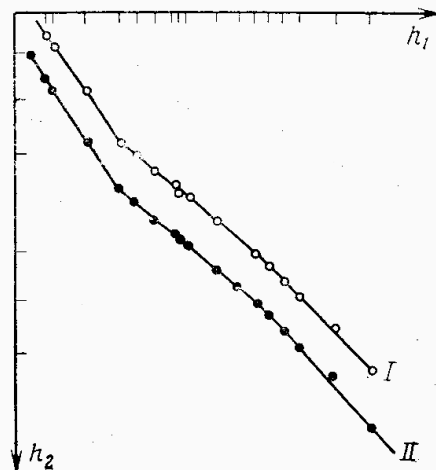


Рис. 24. Корреляционные графики для скв. 3 Крым-Сарайская и скв. 97 Сулеевская (I), скв. 3 Крым-Сарайская и скв. 21 Октябрьская (II)

Впервые это показал Т. Хейтс [44]. Суть его работы в следующем. Предположим, что при образовании пород границы между пластами располагались строго горизонтально. Две скважины, пробуренные в этих отложениях, встретят границы пластов в точках на глубине h'_1, h'_2, h'_3, \dots для первой скважины и в точках $h''_1, h''_2, h''_3, \dots$ для второй. Если на корреляционный график нанести точки с координатами $(h'_1, h''_1), (h'_2, h''_2), (h'_3, h''_3)$ и т. д., то они лягут на прямую с наклоном 45° , так как $h'_i - h'_{i-1} = h''_i - h''_{i-1}$. Корреляционный график существенно не изменится и в том случае, если в результате геологических процессов пласты окажутся смятыми, но мощности их не изменятся и углы наклона окажутся небольшими. Если при образовании пород границы между пластами располагались веерообразно, т. е. плоскости границ пересекались по одной прямой, то точки с координатами $(h'_1, h''_1), (h'_2, h''_2), (h'_3, h''_3)$ лягут на прямую, наклон которой будет определяться коэффициентом сокращения мощности пластов между скважинами (рис. 23). В этом случае говорят, что границы пластов в отдельных скважинах удовлетворяют условиям перспективного соответствия.

Все эти утверждения выглядят вполне тривиальными. Нетривиальность обнаружилась тогда, когда Хейтс показал, что в природе действительно встречаются случаи образования границ пластов по строго геометрическим законам. Он показал также, что разрез часто состоит из этажей, каждый из которых построен по своему, но строгому геометрическому закону.

Проведенная нами проверка показала, что такие ситуации не случайны, а закономерны в пределах распространения морских

отложений (рис. 24). Аналогичные результаты были получены для Западной и Восточной Сибири, Средней Азии, Предкавказья.

Таким образом, используя результат Хейтса, можно изменить алгоритм корреляции разрезов скважин, заменив требование монотонности корреляционной кривой на более сильное требование: корреляционная кривая должна быть кусочно-линейной. Каждый участок корреляционной кривой, представленный отрезком прямой линии, задает закон изменения мощностей данного этажа разреза.

§ 3. ГИПОТЕЗА ХЕЙТСА ИЛИ ЗАКОН ХЕЙТСА?

Утверждение Хейтса о том, что мощности пластов внутри каждого стратиграфического горизонта подчиняются закону перспективного соответствия, является очень сильным утверждением и должно было встретить глубокое недоверие со стороны геологического сообщества. Ведь в геологии господствует идея об особой сложности геологических объектов, об уникальности каждого из них, и мысль, что вся эта сложность и уникальность пронизаны простым законом, противоречит самой идее. Судя по статье Хейтса, видно, что он и сам относится к полученному результату очень осторожно, накладывая различные ограничения на области применимости перспективной корреляции (как потом оказалось, не всегда необходимые). Эта сторона публикации Хейтса уже отмечена Ю. С. Салиным.

Проверка утверждений Хейтса была предпринята автором сразу же после появления его работы в 1963 г. Были проанализированы уже известные корреляционные схемы, полученные на площадях различных геологических регионов СССР: Русская платформа, Северный Кавказ, Волго-Уральская нефтеносная провинция, Средняя Азия, Западная и Восточная Сибирь. Во многих интервалах разреза имеющаяся корреляция подтвердила гипотезу Хейтса: в пределах стратиграфических горизонтов (т. е. последовательности согласно залегающих пластов) корреляционный график представлялся прямой линией. При этом отмечалась такая закономерность: если корреляционная схема в данном интервале отложений не вызывала разногласий среди геологов, то в этих отложениях всегда выполнялось предположение Хейтса. В тех случаях, когда имелись две или три альтернативы схемы корреляции, можно было показать, что одна из них соответствовала закону перспективной корреляции. Наконец, когда некоторый интервал разреза не поддавался геологической корреляции или достоверность его оценивалась крайне низко, выделяемые границы никогда не ложились на корреляционную кривую.

Гипотеза Хейтса с тех пор неоднократно проверялась. Инициативу в этом деле проявляли в основном математики и программисты, которые были заинтересованы в получении такого мощного формального орудия корреляции. Среди геологов, ко-

торые с вниманием отнеслись к этой гипотезе, в первую очередь, необходимо назвать В. А. Долицкого, но таких геологов было немного.

Можно утверждать, что при всех проверках были получены подтверждения гипотезы Хейтса. В литературе имеются даже указания на ее применимость далеко за пределами предполагавшихся границ, например в разрезах, пересекающих рифы [32]. И ни разу никто не сообщил о том, что имеются разрезы, принадлежащие осадочной толще и не слишком смятые в складки, которые уверенно коррелируются по каротажным кривым и не удовлетворяют гипотезе Хейтса. Все это заставляет отнестись к этой гипотезе с величайшим вниманием.

Работа Хейтса не была предназначена для алгоритмизации процесса корреляции разрезов. Он считал ее вспомогательным средством для детальной корреляции разрезов. Хейтс предполагал существование грубой корреляционной схемы на основе руководящих ископаемых или каротажных реперов. Однако нельзя признать справедливым суждение С. А. Салина, что перспективная корреляция не может быть признана первичной, имеющей дело только с исходным фактическим материалом [32]. В качестве подтверждения укажем на алгоритм автоматической корреляции, полностью основанный на гипотезе Хейтса [22]. Закон перспективного соответствия мощностей пластов является единственным критерием, единственным фильтром, отсеивающим множество вариантов сопоставления разрезов. Иными словами, целью этого алгоритма корреляции является такое сопоставление пластов, чтобы оно максимально удовлетворяло гипотезе Хейтса: разрез представлен этажами, внутри которых выполняются условия перспективного соответствия.

Основные идеи перспективной корреляции открывают возможности для геологической интерпретации.

1. В интервале, на котором корреляционный график представлен отрезком прямой, пласты принадлежат одному стратиграфическому подразделению, т. е. внутри этого интервала не содержится стратиграфических несогласий.

Попытаемся обосновать это положение. Пусть некоторое количество пластов в процессе осадконакопления образовалось в согласии с определенным законом перспективного соответствия. Можно также сказать, что в двух рассматриваемых точках поверхности отношение скоростей осадконакопления оставалось постоянным. Если выше этих пластов мы предполагаем стратиграфическое несогласие (размыв), то это означает, что в этом районе режим осадконакопления должен был резко измениться. Должно было произойти поднятие пластов, затем определенное геологическое время занял размыв, впоследствии должно было произойти опускание, после которого начался новый цикл осадконакопления. Можно ли ожидать, что после всех пертурбаций осадочный режим останется в точности тем же? Вероятность такого события равна нулю. Следовательно,

с вероятностью 1 нужно ожидать, что после перерыва в осадконакоплениях образование пластов пойдет по другому закону, тоже удовлетворяющему перспективному соответствию, но с другими параметрами.

Таким образом, перерыв в осадконакоплении с вероятностью 1 должен привести к изменению наклона прямой на корреляционном графике. Следовательно, прямолинейный отрезок корреляционного графика соответствует единому стратиграфическому комплексу.

2. Из предыдущего следует, что если на корреляционном графике соседствуют два интервала с прямолинейными линиями корреляции, имеющими различный наклон, то место стыка отрезков корреляционного графика определяет стратиграфическое несогласие. Поскольку во многих случаях корреляционные точки отклоняются от корреляционной прямой не более чем на 1 м, то наклон прямых определяется с большой точностью. В результате возникает возможность обнаружения очень небольших изменений наклона прямых (несколько процентов), а тем самым обнаружения очень «тонких» несогласий. Заметим, что для этого необходимы лишь две скважины. Обычно для обнаружения таких малозаметных несогласий требуется материал по многим разрезам.

3. Если два соседних отрезка прямых на корреляционном графике имеют одинаковый угол наклона, но сдвинуты друг относительно друга (см. рис. 21), то они соответствуют единому стратиграфическому подразделению. Разрыв между этими отрезками прямых свидетельствует, что одна из скважин пересекает тектоническое нарушение (разлом).

4. Случаи фациального замещения могут быть идентифицированы с помощью корреляционного графика. Рассмотрим три случая фациального замещения. В первом случае пласт представлен в другой скважине породой другой литологии (рис. 25, а). В этом случае корреляционные точки по-прежнему лежат на корреляционной прямой, характерной для данного комплекса, однако геофизические характеристики пласта в этой скважине со-

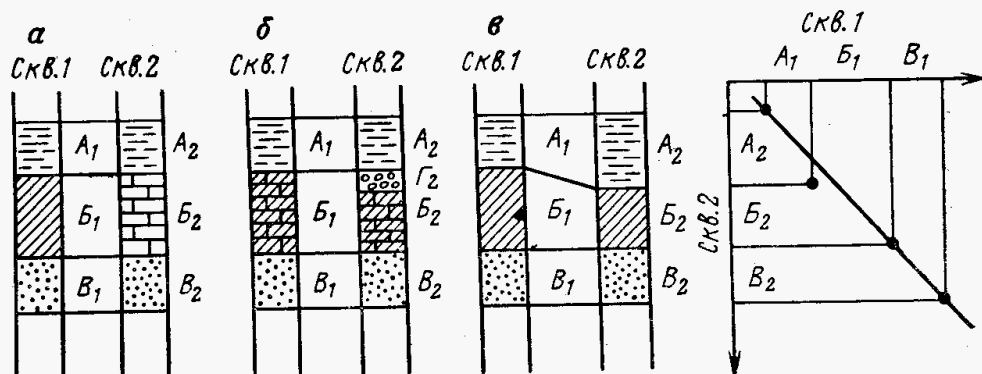


Рис. 25. Схемы фациального замещения

ответствуют пласту другой литологии. Во втором случае пласт частично замещен породой иной литологии (рис. 25, б). В этом случае возникает дополнительная граница, которая не имеет аналога в другой скважине. Остальные границы комплекса лежат на прямой. Аналогичная картина имеет место и в том случае, когда пласт в одной скважине целиком водоносен, а в другом кровельная часть пласта насыщена нефтью или газом. В этом случае также обнаруживается дополнительная граница внутри пласта.

В третьем случае (рис. 25, в) замещенная часть пласта по литологии совпадает с соседним пластом и по геофизическим характеристикам неотличима от него (это самый распространенный случай фациального замещения). В этом случае корреляционная точка на графике не попадает на корреляционную прямую, в то время как окружающие ее корреляционные точки лежат на одной прямой.

В частном случае пласт *Б* в скв. 2 совсем исчезает и тогда граница между пластами *А* и *Б* в скв. 1 не находит себе аналога в скв. 2. Этот случай формально сводится к ситуации, представленной на рис. 25, б.

5. Если разрезы любой пары скважин в пределах отдельного стратиграфического комплекса удовлетворяют условию перспективного соответствия, то это означает следующее: если сдвинуть все точки кровли (или подошвы) пласта вдоль скважины, так, что все они расположатся на одной плоскости, то все остальные границы пластов внутри данного стратиграфического комплекса также будут располагаться на плоскостях. Более того, все эти плоскости (совпадающие с границами пластов) пересекаются по одной прямой (рис. 26), образуя веер плоскостей. Это утверждение было проверено в одном из районов Волго-Уральской нефтеносной провинции, включающей Башкирию и Татарию.

В описанной ситуации достаточно знать мощность пласта или стратиграфического комплекса в трех скважинах, чтобы можно было рассчитать их мощность в любой другой скважине.

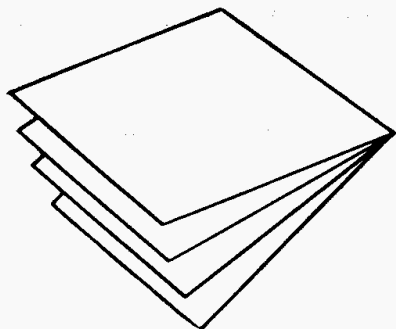


Рис. 26. Пространственная модель перспективной корреляции

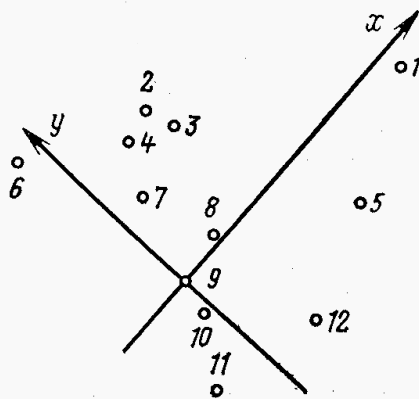


Рис. 27. Схема расположения скважин

В качестве исходных были взяты три скважины: Крым-Сарайская скв. 1, Азнакаевская скв. 23, Акташская скв. 21. Для них были построены корреляционные графики для отложений среднего карбона. Оказалось, что для них удовлетворяются необходимые условия перспективного соответствия. По мощности выделенного комплекса отложений в этих скважинах можно рассчитать мощность того же комплекса в любой другой точке плоскости. Уравнение соответствующей плоскости имеет вид

$$z = 1 - (3x + 4y)/16,$$

где x , y — координаты скважины на площади, z — мощность в данной скважине (мощность отложений в начале координат, т. е. в скв. 1, принята за единицу). Схема расположения скважин по отношению к координатным осям дана на рис. 27.

Затем были построены корреляционные графики для ряда скважин различных месторождений Татарии и Башкирии. Оказалось, что в большинстве случаев коррелируемые точки ложатся на прямые, наклон которых и определяет коэффициенты изменения мощностей в каждом случае. Полученные таким путем величины сравнивались с величинами, полученными из расчетов по приведенной выше формуле (табл. 9). Среднее квадратическое отклонение составляет менее 3 %, что сравнимо с погрешностью построений. Таким образом, оказалось возможным с высокой точностью предсказывать мощность определенных отложений на большой площади, что подтверждает правильность исходных геометрических соображений.

Конечно, трудно определить заранее область, в которой сохраняется единый закон перспективного соответствия (в пределах каждого стратиграфического комплекса). В рассмотренном примере эта область имеет примерно 150 км в диаметре. В работе [32] упоминается, что в пределах Западной Сибири при очень больших расстояниях между скважинами перестает выполняться закон перспективного соответствия мощностей (нужно полагать, что существование литологической корреляции для этих разрезов подразумевается). Установление областей сохранения перспективного соответствия для различных

Таблица 9

Относительная мощность отложений

Площадь	Измеренная	Расчетная	Площадь	Измеренная	Расчетная
Крым-Сарайская	1,0	1,0	Каргалинская	0,84	0,86
Стахановская	0,93	0,91	Чекмагушская	0,92	0,92
Шкаповская	0,84	0,84	Аксубаевская	1,22	1,24
Поповская	1,14	1,17	Югомашевская	1,03	0,99
Сулеевская	1,16	1,13	Минибаевская	1,05	1,10

стратиграфических комплексов является само по себе важной геологической задачей. Такие области являются, очевидно, областями единого тектонического режима и могут быть связаны, например, с различными блоками земной коры, существовавшими в эпоху осадконакопления.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что рассмотрение стратиграфических и тектонических нарушений не есть усложнение модели Хейтса. Существование нарушений может быть обнаружено только на основе принятия законов перспективного соответствия. Примечательно, что размыты и разломы объединяются общим понятием «нарушения». Они и есть нарушения законов перспективного соответствия (включающих в себя предположение о непрерывности слоев). Следует добавить утверждение, что гипотеза Хейтса относится к закономерностям образования пластов, т. е. относится к прошлому. Таким образом, гипотеза эта является, по существу, генетической.

За два десятилетия после опубликования гипотезы Хейтса она выдержала многочисленные проверки и подтвердила свою справедливость в очень широком диапазоне геологических условий. Тем самым она получила право на присвоение статуса «закон Хейтса»: история осадконакопления в каждом бассейне делится на эпохи стабильных режимов; в каждую эпоху все границы между пластами лежат в плоскостях, которые пересекаются по одной прямой.

Выше мы исследовали следствия закона Хейтса, полезные для осуществления литологической корреляции и геологической интерпретации результатов корреляции (выделение разломов, размытов, фациального замещения). Однако этим не исчерпывается его познавательная ценность. Из содержащихся в нем утверждений можно сделать некоторые выводы, касающиеся законов образования пластов. Излагаемые далее утверждения являются логическими следствиями закона Хейтса в сочетании с некоторыми «естественными» предположениями. Вряд ли можно настаивать на их безусловной справедливости. Какие-либо из этих утверждений могут показаться неприемлемыми для некоторых геологов, но для конструктивной критики этих выводов недостаточно ограничиться их отрицанием. Необходимо указать на источник ошибки в исходных предположениях: или в законе Хейтса, или в принятых «естественных» предпосылках, или в способе рассуждений. Итак, рассмотрим некоторые следствия закона Хейтса.

1. Поскольку утверждается, что все границы между пластами, образовавшимися в эпоху с единым режимом осадконакопления, есть плоскости, то естественно предположить (из соображений простоты), что верхняя граница пласта была плоской в момент своего возникновения. Отказ от этого предположения означал бы, что граница пласта (первоначально отличавшаяся от плоскости) в дальнейшей истории претерпела такие изменения под действием геологических сил, что стала

плоской. Более того, эти геологические силы должны были бы действовать на каждую границу комплекса по-своему. Такое предположение кажется невероятным, и посему необходимо принять исходную посылку — границы пластов являются плоскими в момент своего образования.

2. Принятие предыдущего положения ведет к принятию следующего утверждения: верхняя граница пласта является плоскостью в любой момент осадконакопления. Если бы это было не так, то нужно было бы предположить механизм, который связывает момент изменения режима осадконакопления, т. е. момент образования литологической границы, с геометрией поверхности осадконакопления. Принцип простоты требует принятия исходного предположения.

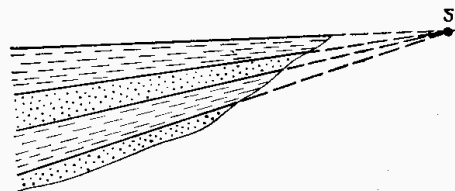
3. Пока длится эпоха стабильного осадконакопления, границы между пластами остаются плоскими. Это означает, что пласты в эту эпоху не подвергаются никакой деформации внешними силами. В частности, это означает, что весь осадочный комплекс целиком покоится на блоке земной коры, который в данную эпоху можно считать неделимым.

4. Уплотнение пород, нагружаемых сверху новыми пластами, или малó (относительно мощностей пластов), или происходит пропорционально мощности осадков. Лишь в этих случаях уплотнение пород не нарушает отношений перспективного соответствия между границами.

5. Единственной силой, способной обеспечить плоскую поверхность осадконакопления, является гравитационная сила, проявляющаяся плоской водной поверхностью. Однако гравитационная сила может обеспечить только горизонтальное положение плоскости (а не какое-либо иное). Следовательно, поверхность осадконакопления в любой момент времени горизонтальна.

6. Эпоха стабильного осадконакопления размечена особыми событиями — периодами образования границ между пластами различной литологии. Смену литологии осадков могут вызвать геологические события в блоке, на котором идет процесс осадконакопления. В таком случае должна наблюдаться следующая картина. Процесс стабильного опускания, который характеризуется постоянными скоростями осадконакопления в различных точках, прерывается масштабным геологическим событием, резко меняющим осадочный материал на большой территории. Затем, по прошествии этого события, режим осадконакопления восстанавливается с теми же скоростями осадконакопления. И так происходит много раз. Трудно представить себе масштабное геологическое событие, которое не сопровождалось бы изменением режима опускания. Поэтому более разумным (и простым) выглядит предположение, что возникновение границ связано или с геологическими катаклизмами вне данного блока, или с резкими изменениями уровня моря (что тоже связано с геологическими событиями планетарного масштаба).

Рис. 28. Схема отложений вблизи береговой линии



7. Поскольку горизонтальная поверхность осадконакопления может образовываться лишь в море и лишь на не слишком больших глубинах, то опускание осадочной толщи должно происходить примерно с такой же скоростью, как и накопление осадков, с тем чтобы поверхность осадконакопления оставалась в том же интервале глубины. Таким образом, нормой является компенсированное опускание. Механизм компенсированного опускания трудно представить иным, чем саморегулируемый процесс (масса осадков определяет степень опускания). В противном случае необходимо было бы согласовать два независимых процесса: привнос осадков и опускание блока.

8. В течение всей эпохи стабильного осадконакопления плоскости, в которых лежат границы пластов, пересекаются по одной прямой. Конечно, что не означает, что пласты фактически уменьшаются в мощности до нуля. Они обычно обрываются раньше (рис. 28). Поэтому указанная прямая не является местом пересечения всех границ пластов; она в этом смысле мнимая прямая. Однако поскольку реальное движение осадочных пород происходит как вращение вокруг этой прямой, то она (эта прямая) есть ось реального вращения блока (поскольку осадочная толща неподвижна относительно блока). Ось реального вращения блока фиксирована в блоке в течение всей эпохи стабильного осадконакопления. Положение этой оси в каждую эпоху может быть восстановлено в результате корреляции разрезов соответствующей толщи.

Таковы выводы, следующие из закона перспективного соответствия Хейтса. Эти выводы получены достаточно формально, однако с привлечением «очевидных» утверждений. Это делает их уязвимыми для критики, для сопоставления с геологическими реалиями и нахождения неверных посылок. Любое научное обсуждение этих выводов пойдет на пользу геологическому знанию. Опасно лишь отрицание: «Этого не может быть, потому что не может быть никогда».

Как и во многих других местах этой книги, мы хотим показать, что предлагаемые определения, модели, алгоритмы хотя и носят в значительной степени формализованный характер, но по сути дела основываются на предшествующем опыте геологии, ее методах и теориях.

Первую в нашей стране карту мощностей построил в 1913 г. И. М. Губкин для рукавообразно залегающей нефтеносной толщи в основании майкопской свиты Нефтяно-Ширванского района. В 30—40 гг. метод анализа мощностей, разработанный

в СССР главным образом В. В. Белоусовым и его последователями, получил большое распространение. Важное значение этому методу придавали Н. С. Шатский и А. Л. Яншин. Метод анализа мощностей использовался для количественной оценки вертикальных тектонических движений. Этот метод и занимал столь ведущее место в геологии, поскольку в то время господствовало представление о ведущем значении вертикальных движений Земли в тектонических режимах различных районов. В настоящее время этот метод как бы забыт. Понятно, что это лишь временное явление, ибо в основе метода анализа мощностей лежит анализ фактического материала и реальной геометрии слоистых сред. Ю. А. Косыгин считает, что метод анализа мощностей, часто отбрасываемый как орудие «вертикализма», должен быть переоценен в связи с новыми концепциями и снова взят на вооружение теорией и практикой геологоразведочных работ. Модель Хейтса и сформулированный им закон являются важным вкладом в развитие метода анализа мощностей и способствуют возрождению интереса к этой области.

Закон Хейтса и основанная на нем модель не только принадлежат традиционной области геологических исследований, но и содержат в себе ряд наблюдений и обобщений, уже признанных в геологии. Вот что пишет, например, Ю. А. Косыгин: «Если по ряду свойств образующего слой вещества можно предположить, что оно отлагалось на выровненной поверхности, которая в первом приближении может быть принята за горизонтальную, и если слой формировался в постоянном положении относительно уровня моря или другой условной уровенной поверхности, то диаграммы мощности и карты изопахит могут быть использованы для определения суммарной амплитуды вертикального перемещения поверхности Земли во время отложения слоя» ([23], стр. 107). В этом высказывании содержатся утверждения, во многом совпадающие с моделью Хейтса: поверхность осадконакопления горизонтальна (следовательно, она плоская), определяющим является уровень моря, постоянной — глубина этой поверхности, режим осадконакопления — компенсаторный.

Ряд утверждений модели Хейтса совпадает с точкой зрения В. В. Белоусова, сформулированной в 1939 г.: между быстротой накопления осадков и интенсивностью погружения земной коры устанавливается весьма полное соответствие и в течение продолжительных отрезков времени один процесс почти в точности компенсируется другим; допускается, что все морские отложения мелководны.

Возражения, которые выдвигались против таких утверждений, очень симптоматичны. Противоречащие примеры, как правило, касались мощности осадков, отлагавшихся на эрозионных поверхностях или заполнявших существовавшие впадины, т. е. во всех случаях это были мощности слоев, примыкавших к границе стратиграфического несогласия. Вот к каким выводам пришел Б. М. Келлер, анализируя различные взгляды на метод ана-

лиза мощностей. Полное соответствие между величинами прогиба и заполнения прогиба осадками наблюдается чаще всего в случае мелководных отложений. В прогибах геосинклинальных областей и эрозионных впадинах мощности определялись не прогибами, а заполнением этих впадин осадками. Такое ограничение действия закона полной компенсации согласуется с моделью Хейтса, которая утверждает полную компенсацию только внутри эпохи стабильного осадконакопления. Можно полагать, что и другое ограничение, указанное Б. М. Келлером, — мелководность отложений — также соответствует модели Хейтса, ибо вне мелководных отложений вряд ли имеет место плоская горизонтальная граница осадконакопления. Это ограничение не ущемляет закона Хейтса. Модель Хейтса по-прежнему можно использовать в качестве основного закона, а невыполнение некоторых условий модели необходимо трактовать, например, как указание на глубоководный характер осадков.

В рамках модели Хейтса трудно объяснить наличие строго параллельных границ. Для этого необходимо предположить строго поступательное опускание блока земной коры. Возможной причиной такого рода границ (строго параллельных) могут служить эвстатические колебания уровня океанов. Эвстатические колебания представляют собой общее изменение уровня, наступающее вследствие изменения формы океана, а также в результате изменения в нем количества воды. Обнаруживаются эти глобальные колебания по одновременному распространению трансгрессий на всей Земле. Б. Гутенберг определил по данным 1860—1940 гг. эвстатическое поднятие уровня океана в 12 см за 100 лет. Принятие этой гипотезы несколько увеличивает неопределенность интерпретации модели Хейтса. Если перерыв в осадконакоплении произошел между двумя периодами, когда геометрия границ задавалась эвстатическими колебаниями уровня океана, то на корреляционном графике оба периода будут отражены корреляционными прямыми с одним и тем же углом наклона (45°). Поэтому такой перерыв в осадконакоплении нельзя отличить от разрывного нарушения.

Не следует считать, что закон Хейтса должен выполняться всегда и везде. Этот закон есть лишь норма, точка отсчета. Он выполняется достаточно часто для того, чтобы отклонения от него можно было содержательно интерпретировать и вводить соответствующие причины. Чтобы существовала синкопа, должен существовать такт.

Завершая теоретическую часть проблемы корреляции, подчеркнем еще раз, что корреляция разрезов по данным каротажа (или по другим литологическим характеристикам) не может быть реализована на базе использования лишь исходных данных. Только использование априорных знаний или в слабой форме (в форме вернеровской модели бесконечных непрерывающихся пластов), или в сильной форме (в виде закона Хейтса) позволяет провести корреляцию. Только после выяснения этих

предпосылок можно было построить алгоритм автоматической корреляции разрезов.

Рассмотрение проблемы корреляции оказалось полезным и по той причине, что была выяснена роль генетических моделей на самых первичных уровнях обработки геологических материалов при непосредственном восприятии геологических схем, разрезов, профилей. Наконец, мы затронули вопросы построения модели (а можно сказать, теории), которые являются вершиной неформального анализа данных и будут рассмотрены в четвертой части.

§ 4. ПРИМЕР КОРРЕЛЯЦИИ РАЗРЕЗОВ НА ЭВМ¹

Оренбургское газоконденсатное месторождение было выведено на проектную мощность добычи газа в 1978 г. И почти сразу же возникли непредвиденные затруднения в его дальнейшей эксплуатации из-за появления очагов и интервалов неконтролируемого обводнения отдельных скважин и участков месторождения. В связи с этим возник вопрос о необходимости пересмотра геолого-геофизической модели месторождения.

Подсолевая продуктивная толща Оренбургского газоконденсатного месторождения представлена отложениями нижнепермско-каменноугольного возраста. На основании обобщения палеонтологических данных и промыслово-геофизических измерений в разрезе скважин прослеживаются границы стратиграфических подразделений артинского (P_1 art), сакмарского (P_1 skm), ассельского (P_1 ass) ярусов нижнепермской толщи и верхнего карбона (C_3). Однако до сих пор остается дискуссионным вопрос отбивки границы верхнего карбона. Нет также единого мнения по поводу отнесения нижней границы так называемых «верхних ангидритов» к вышележащим кунгурским или нижележащим артинским отложениям.

Несовершенство геологической модели особенно остро почувствовалось при эксплуатации залежи: по мере интенсификации добычи газа и введения в эксплуатацию новых участков появились очаги неконтролируемого обводнения скважин и участков. Потребовались уточнение и пересмотр некоторых представлений о геологической модели Оренбургской залежи путем привлечения накопленного к настоящему времени обширного объема промысловой, геологической и геофизической информации. В связи с этим в лаборатории ядерной геофизики МИНГ им. И. М. Губкина была проведена корреляция ряда скважин на этом месторождении с помощью ЭВМ, используя алгоритмы, созданные на основе принципов корреляции, изложенных в § 2 гл. VI. Эти работы проводились с целью: 1) выделить этажи в разрезе залежи; 2) установить закон изменения мощностей внутри каждого этажа и проследить изменение мощностей от

¹ Этот параграф написан совместно с О. И. Бариновой, Е. Е. Калининой, М. И. Овчинниковой.

скважины к скважине; 3) уточнить отбивки границ стратиграфических подразделений и, если окажется возможным, зафиксировать тектонические нарушения в наиболее ослабленной в тектоническом отношении зоне центрального свода залежи.

Проведенная затем машинная корреляция разрезов девяти скважин центрального свода залежи в интервале артинско-среднекаменноугольных отложений (скв. 33, 85, 87, 96, 117, 124, 153, 177-Д, 809) мощностью от 400 до 700 м по комплексу двух геофизических методов (гамма-каротаж и нейтронный гамма-каротаж) позволила сделать вывод о том, что исследуемый разрез состоит из пяти этажей, характеризующих незначительные изменения мощностей стратиграфических толщ в направлении с севера на юг и изменение мощности артинской толщи с запада на восток. С помощью машинной корреляции удалось более надежно зафиксировать границу отложений верхнего карбона (C_3), а также следующие интервалы размывов: в кровле артинской толщи внутриартинский (в кровле продуктивной толщи), в кровле ассельских отложений (предсакмарский) и в кровле верхнекаменноугольных отложений. В большинстве случаев между кунгурскими и артинскими отложениями положение излома и разрыва линии корреляции свидетельствует о принадлежности пачки верхних ангидритов к кунгурским отложениям. Отбивки границ, полученных геологами, и машинных в большинстве случаев совпадают, но требуют уточнения для некоторых пар скважин в ассельских и каменноугольных отложениях. Нарушение типа взброс-сброс на исследованных парах скважин не обнаружено.

В качестве примера машинной корреляции разрезов скважин Оренбургского газоконденсатного месторождения (ОГКМ) приведем здесь результаты по трем скважинам (809, 177-Д, 124), расположенным на центральном куполе месторождения. Корреляция проводилась в два этапа. На первом этапе были прокоррелированы три пары скважин: скв. 809 и 177-Д; скв. 177-Д и 124; скв. 124 и 809. В результате для каждой пары был получен набор вариантов отрезков корреляционных прямых (8; 8 и 9 соответственно), а затем произведен предварительный отбор наиболее перспективных из них в смысле возможности включения в линию корреляции (так называемые перспективные отрезки). Опишем корреляционный график, полученный для пары скв. 809 и 177-Д (рис. 29).

Корреляция проводилась одновременно по диаграммам двух геофизических методов — гамма-каротажа и нейтронного гамма-каротажа¹. Соответствующие диаграммы нанесены на графике вдоль осей глубин этих скважин. Диаграммы скв. 809 были

¹ В этом случае в программе используется комплексный коэффициент корреляции интервалов в двух скважинах, являющийся нелинейной комбинацией коэффициентов корреляции, вычисленных по кривым каждого метода в отдельности.

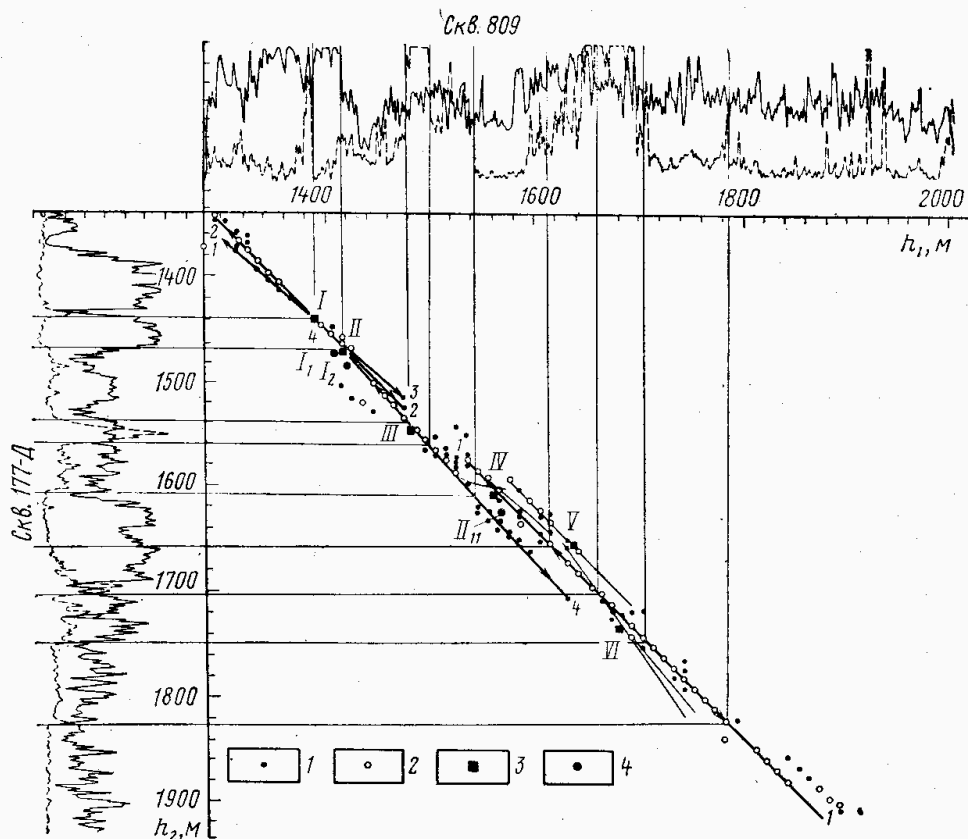


Рис. 29. Корреляционный график для скв. 809 и 177-Д Оренбургского месторождения.

Максимумы коэффициента корреляции: 1 — локальный, 2 — глобальный; реперы: 3 — по каталогу Оренбурггазпрома, 4 — по каталогу ВНИИгаза

разбиты на участки длиной по 50 м каждый. Начало каждого следующего участка сдвинуто относительно начала предыдущего на 10 м. Каждый такой участок скв. 809 последовательно сопоставлялся с равновеликими участками диаграммы скв. 177-Д, сдвигавшимися относительно друг друга на 1 м.

В результате для каждого из участков скв. 809 было определено положение нескольких максимумов функции корреляции сопоставляемых диаграмм K_i , превышающих некоторый порог. Анализируя положение максимумов K_i на корреляционном графике, программа отобрала четыре отрезка корреляционных прямых (1—4), каждая из которых наилучшим образом удовлетворяет (в определенном смысле) основным принципам похожести и перспективного соответствия. В результате корреляционный график пары скв. 809 и 177-Д оказывается разбитым на три интервала, каждый из которых может быть описан различными вариантами возможных отрезков линии корреляции. Верхний интервал (до глубины около 1390 м по скв. 809) описан двумя отрезками, являющимися частями прямых 2 и 3 до точки их пересечения, из которых предпочтение нужно отдать отрезку 2, так как он проходит через большее число максимальных точек кор-

реляции. Наличие двух близких вариантов корреляции (отрезков 2 и 3) обусловлено, вероятно, значительными литофациальными замещениями, которые приводят к большой изменчивости разреза по простиранию. Вторая часть рассматриваемого разреза (до глубины около 1480 м по скв. 809) перекрывается тремя вариантами отрезков прямых 2, 3, а также частью прямой 4, которая затем на следующем интервале продолжается без конкурентов до начала прямой 1. Поскольку отрезок 4 не является продолжением ни отрезка 2, ни отрезка 3, то при принятии любого из вариантов корреляции (по отрезку 2 или 3) в этом интервале разреза существует излом корреляционного графика, т. е. несогласие с выпадением части разреза до 20 м в скв. 809.

На третьем интервале линия корреляции (до начала прямой 1) проходит, безусловно, вдоль отрезка прямой 4, как единственного описывающего данный участок разреза. На следующем (четвертом) интервале, где имеются два варианта корреляции (от начала прямой 1 до конца прямой 4), происходит переход линии корреляции от прямой 4 к прямой 1 с выпадением более 20 м разреза по скв. 177-Д. Наконец, нижняя (пятая) часть корреляционного графика описывается единственным отрезком линии корреляции — прямой 1.

Таким образом, весь интервал разреза по корреляционному графику пары скв. 177-Д и 809 предварительно может быть разбит на три этажа, закон корреляции для первого из которых описывается одним из отрезков 2 или 3, для второго — отрезком 4, а для третьего — отрезком 1. В дальнейшем потребуется выбрать как более достоверный один из вариантов отрезков для первого этажа, а также уточнить границы между этажами, которые являются границами несогласия.

Для сравнения результатов ручной и машинной корреляции на графике отмечены априорные точки корреляции, отбивки границ которых взяты из каталога Оренбурггазпрома. Видно, что точки I и II (кровля артинских отложений и кровля продуктивной пачки) хорошо ложатся на полученные отрезки линии корреляции, т. е. в этих точках разреза корреляция геологов и машинная корреляция совпадают. Точки III и IV (кровля сакмарских и кровля ассельских отложений) отстоят от соответствующих корреляционных прямых на 5—7 м. Точки V и VI, соответствующие отбивкам кровли отложений верхнего и среднего карбона, отстоят от линии корреляции на 20 и 15 м.

На рис. 29 видно, что каждая из шести рассмотренных корреляционных точек, полученных геологами, лежит вблизи одного из высоких максимумов функции корреляции. Это означает, что во всех интервалах существует сходство каротажных кривых в скв. 809 и 177-Д. Тем самым удовлетворяется один из принципов алгоритма корреляции разрезов — принцип схождения. Представленные шесть точек удовлетворяют также второму принципу корреляции — принципу одинаковой упорядоченности пластов в различных скважинах. Однако точки V и VI не

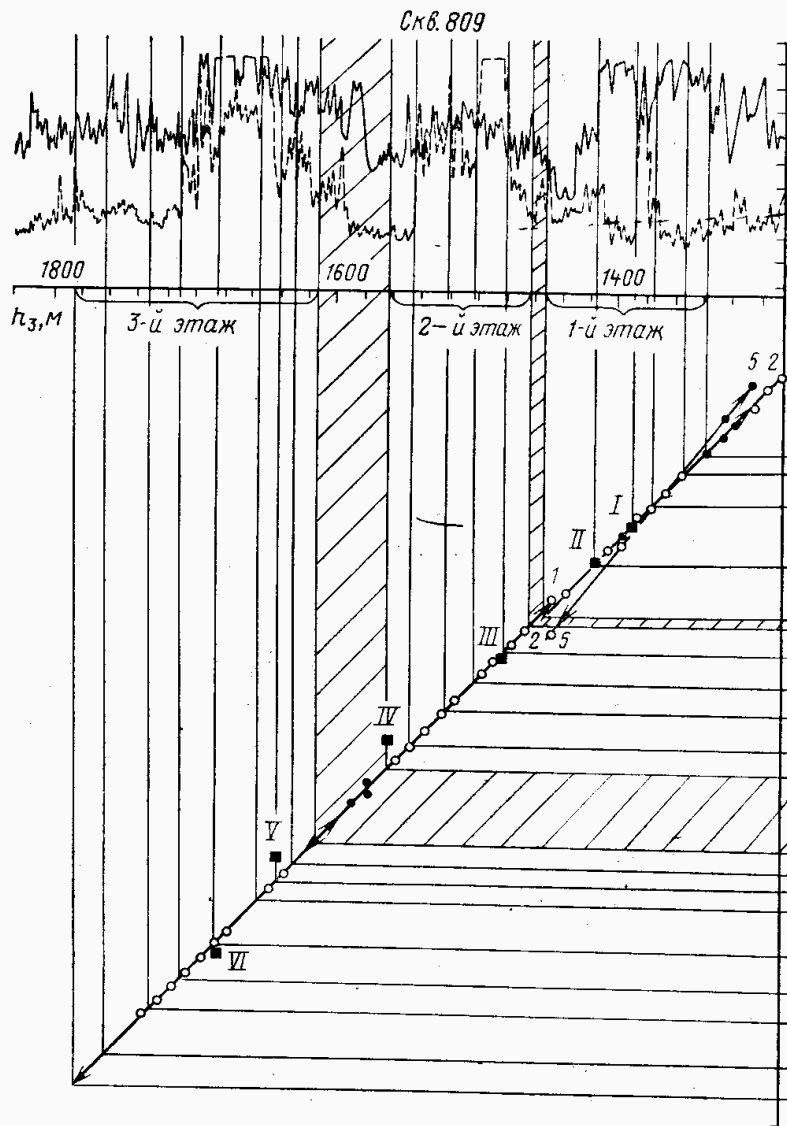
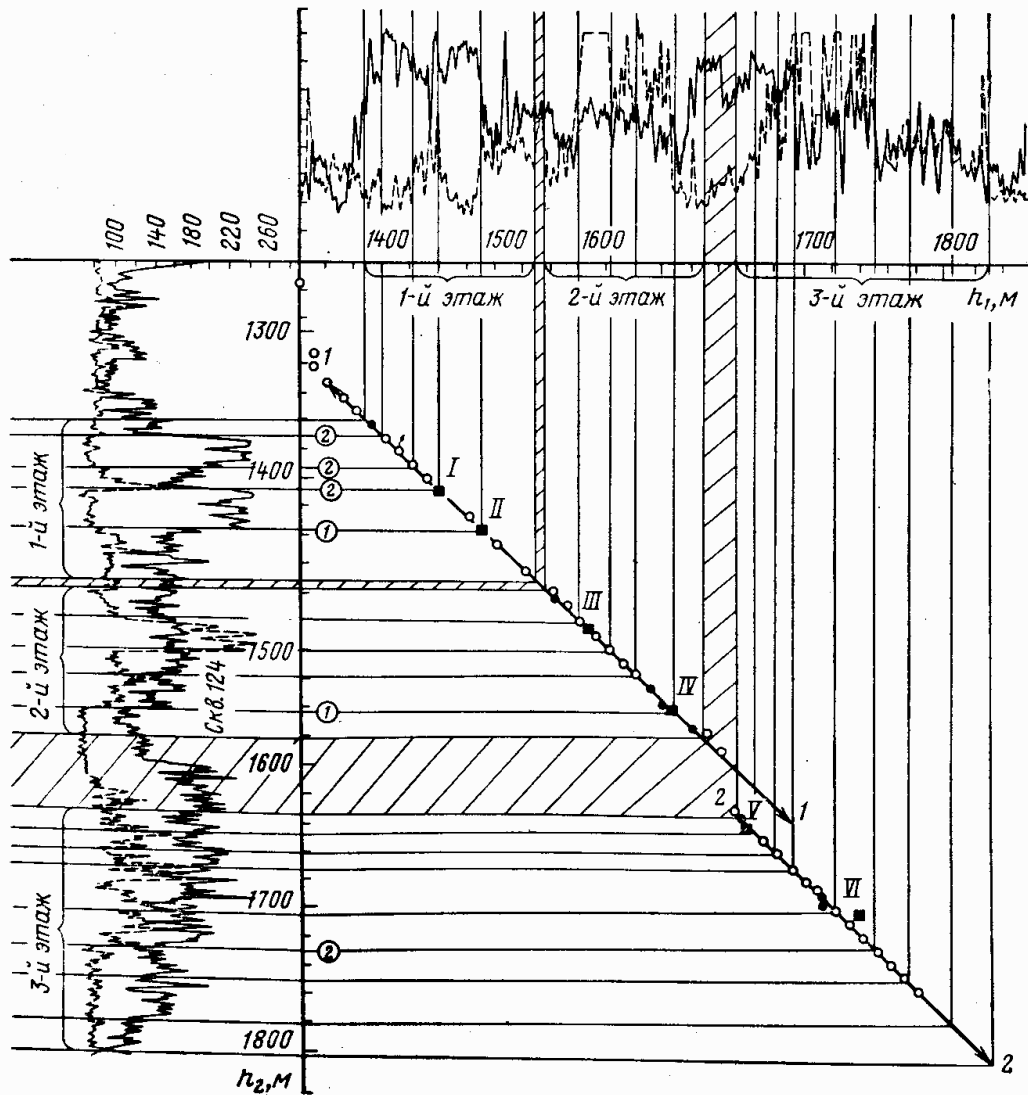


Рис. 30. Корреляционные графики для скв. 809 и 124, скв. 124 и 177-Д

удовлетворяют принципу перспективного соответствия. В то же время точки корреляции, полученные машинным путем, удовлетворяют всем трем принципам одновременно.

Было также проведено сравнение машинной корреляции с другим, более поздним, вариантом корреляции разреза ОГКМ, занесенным в каталог ВНИИГаза. Большинство точек корреляции геологов в этом варианте совпадает с машинной корреляцией (см. рис. 29). Однако имеются три несовпадающие точки (I_1 , I_2 , II_{11}). Все три точки лежат в стороне от корреляционных прямых, и вблизи них нет максимумов коэффициента корреляции. Таким образом, эти точки корреляции не удовлетворяют ни принципу перспективного соответствия, ни даже принципу сходства.



Аналогичным образом была проведена машинная корреляция и проанализированы корреляционные графики двух других пар скважин — скв. 177-Д и 124, скв. 124 и 809.

На втором этапе корреляции анализируются наборы корреляционных прямых трех пар скважин с целью выявления комбинаций, наилучшим образом удовлетворяющих одному и тому же закону перспективного соответствия всех трех скважин. На рис. 30 представлены корреляционные графики скв. 177-Д и 124 и скв. 124 и 809 после тройного сопоставления, т. е. с учетом взаимного согласования всех трех корреляционных графиков. Стрелками на этих графиках (так же, как и на рис. 29) обозначены интервалы прямых, прошедшие тройное сопоставление. На графике видно, что верхний интервал разреза (1-й этаж) описывается двумя вариантами корреляции.

Корреляция 2-го этажа разреза однозначна. На графике скв. 177-Д и 124 корреляционная прямая является продолжением корреляционной прямой для 1-го этажа (прямая 1), на двух других графиках происходит разрыв линий корреляции с небольшим (на 5 м) увеличением мощности разреза скв. 809.

Корреляция 3-го этажа разреза также однозначна. При этом для 1-й и 3-й пар скважин не происходит разрыва линии корреляции (это все те же прямые 1), однако здесь заметны пропуски точек корреляции (литофациальные замещения). Для пары же скв. 177-Д и 124 наблюдается разрыв линии корреляции с выпадением около 30 м разреза по скв. 177-Д.

Чтобы окончательно выбрать линию корреляции на 1-м этаже разреза и уточнить интервалы разрыва между 1-м и 2-м, а также 2-м и 3-м этажами, были прослежены границы пластов, выделенных в разрезах трех скважин, с помощью корреляционных прямых. Каждый отрезок корреляционной прямой задает соответствие между разрезами двух скважин (в заданном интервале глубин). Таким образом, можно проверить, соответствуют ли границы пластов в одной скважине границам пластов того же знака в другой скважине. С этой точки зрения наиболее приемлемым оказался вариант корреляции, включающий отрезок 2 на корреляционном графике для пары скв. 809 и 177-Д и отрезок 2 для пары скв. 809 и 124.

Прослеживая границы пластов, можно уточнить положение границы несогласия между этажами. Разрыв линии корреляции между 1-м и 2-м этажами зафиксирован на глубине от 1509 до 1514 м по скв. 177-Д (между последней прослеженной границей 1-го этажа и первой прослеженной границей 2-го этажа). Интервал разрыва между 2-м и 3-м этажами соответственно фиксируется на глубине от 1630 до 1655 м (по той же скважине). На корреляционных графиках приведены некоторые наиболее существенные из прослеженных границы. Нужно отметить, что по всем трем скважинам прослеженные границы имеют высокий ранг при автоматическом выделении границ (который отмечен на оси скв. 124 цифрой в кружке) и могут быть отмечены в качестве реперных отбивок ЭВМ.

На рис. 31 приведена корреляционная схема исследуемых разрезов трех скв. 809, 177-Д и 124. Выше отмечалось, что исследуемые отложения геологами разбивались на пять этажей, между которыми фиксировались четыре размыва. Однако результаты корреляции трех скважин свидетельствуют об отсутствии внутриартинского и предсакмарского размывов в направлении с северо-запада на юго-восток, и весь разрез оказывается разбитым всего на три этажа. На схеме прослежены верхняя и нижняя границы трех выделенных этажей разреза, а также отмечены интервалы перехода между этажами. Справа отмечены стратиграфические подразделения, выделяемые в разрезе ОГКМ. Видно, что граница между 1-м и 2-м этажами фиксирует небольшой внутриартинский размыв, граница между 2-м и 3-м

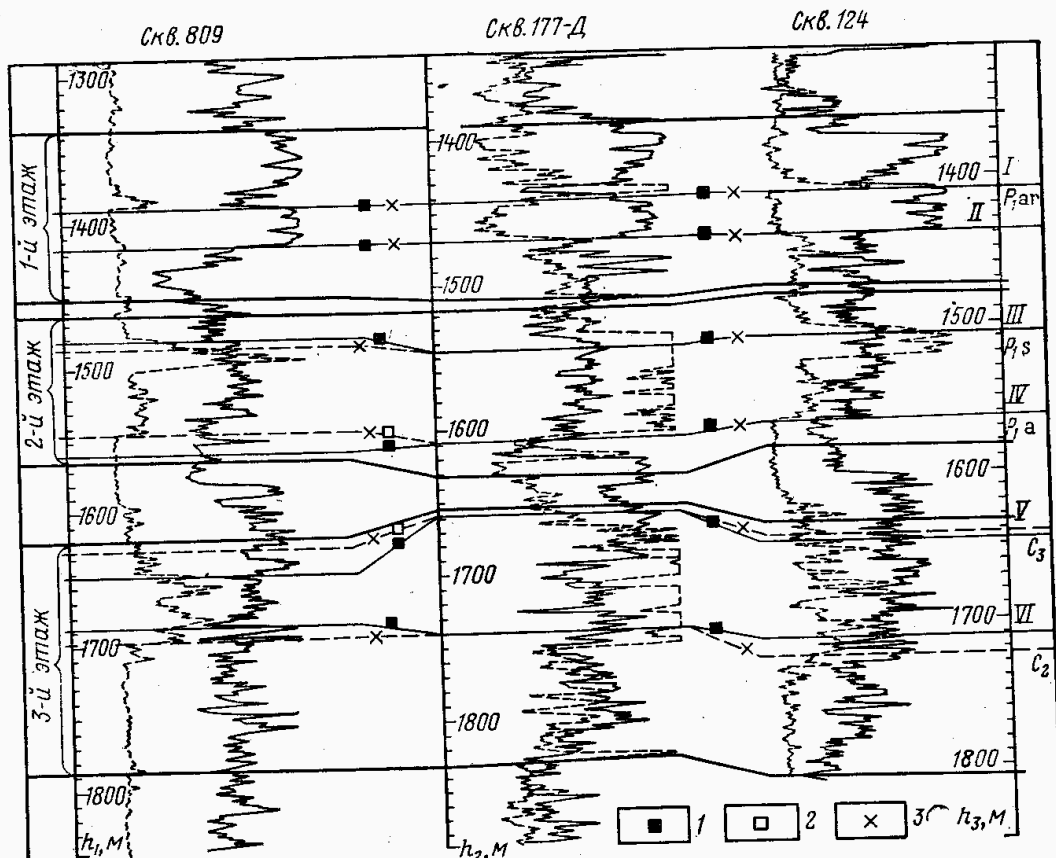


Рис. 31. Схема корреляции скв. 809, 177-Д и 124.
 Реперы: 1 — Оренбурггазпрома, 2 — ВНИИгаза, 3 — машины

этажами — предассельский разрыв, довольно значительный в разрезе скв. 177-Д. В пределах 1-го этажа стратиграфические границы кровли $P_1 ag$ и кровли следующего пласта прослежены геологами и ЭВМ одинаково. В пределах 2-го этажа отбивки кровли $P_1 s$ и $P_1 a$ по каталогу ОГКМ и на ЭВМ различаются в разрезе скв. 809. На 3-м этаже разреза границы C_3 и C_2 , установленные геологами и с помощью ЭВМ, существенно различаются (на 10—25 м). Чтобы окончательно выбрать несовпадающие границы, необходимо сравнить степень обоснованности тех и других.

Анализ полученных корреляционных графиков позволяет также сделать вывод об отсутствии нарушений типа сброса или взброса между рассматриваемыми скважинами; ни на одном графике не обнаружен разрыв корреляционной прямой без изменения ее наклона.

После окончательного выбора линии корреляции можно в зависимости от конкретно поставленной задачи проследить границы пластов, пропластков и т. д. любой степени детальности (именно эту задачу и ставил перед собой Хейтс в своей первой работе по перспективной корреляции). На рис. 32 приведена

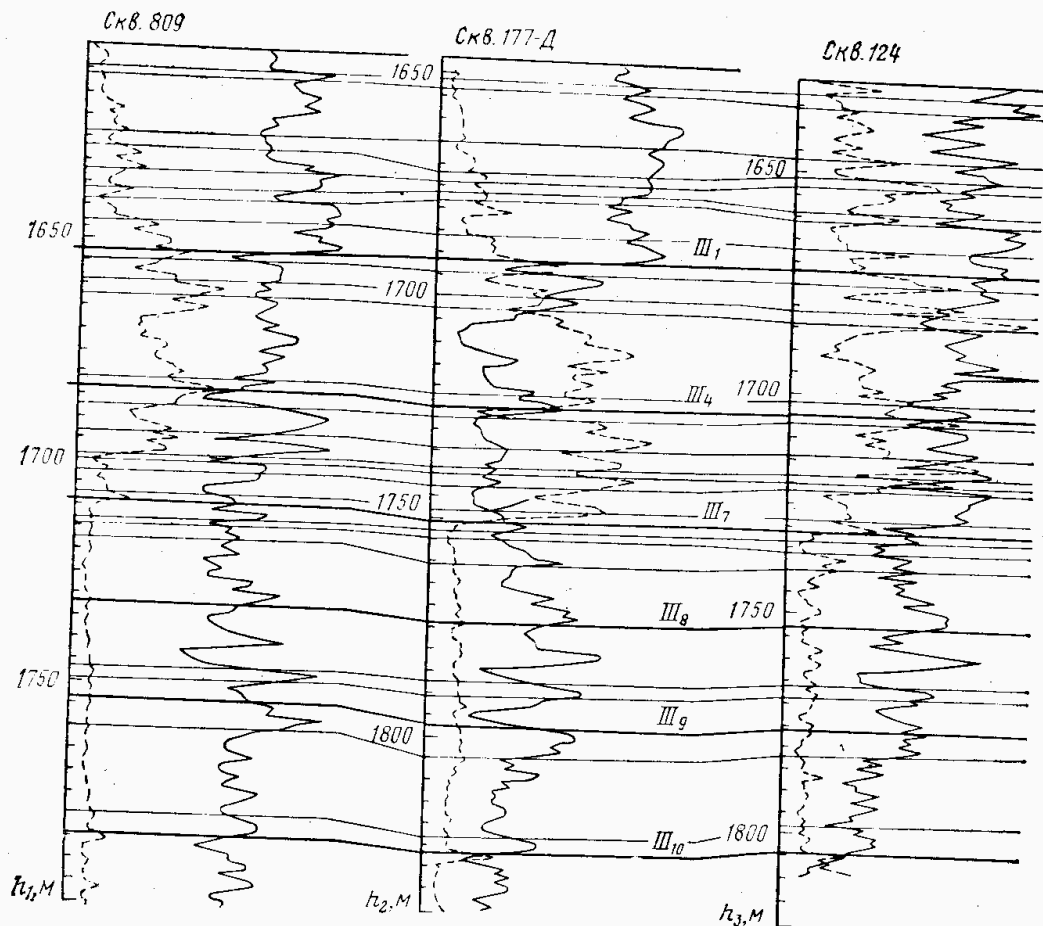


Рис. 32. Корреляционная схема 3-го этажа разреза Оренбургского месторождения

детальная корреляционная схема 3-го этажа разреза скв. 809, 177-Д и 124, охватывающего отложения верхнего и среднего карбона. Этот интервал разреза представляет собой III эксплуатационный объект, разделенный на пачки III₁—III₁₀ геологами ВНИИгаза. На схеме показаны границы, которые: 1) выделены в каждой скважине программой автоматического расчленения разрезов по каротажным кривым, 2) согласованы между собой во всех трех скважинах с помощью корреляционных прямых. Следует отметить, что машина нашла все границы, выделенные геологами (III₁, III₄, III₇—III₁₀), и положения этих границ совпали с точностью до 1 м с отбивками ЭВМ.

Часть третья

АНАЛИЗ ДАННЫХ И ЦЕЛОСТНЫЙ ПОДХОД

Глава VII

ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ (СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД)

§ 1. ОБЩИЕ ОСНОВАНИЯ ПРОЦЕДУРЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Выделение объектов — фундаментальная проблема геологии. Операция выделения объектов существовала в геологии столько, сколько существует геология, однако как научная проблема она стала осознаваться лишь последние два десятилетия. Способствовала этому в первую очередь многогранная и энергичная деятельность Ю. А. Косыгина, Ю. А. Воронина и др. по анализу фундаментальных понятий геологии [11, 23]. К важнейшим объектам, которыми оперирует геология, относятся геологические тела и геологические границы. Нужно отметить фундаментальное отличие между этими объектами. Геологические тела являются материальными объектами, а геологические границы — идеальными объектами. Геологические тела описываются бесчисленным количеством химических и физических свойств (химический состав, минералогический состав, гранулометрический состав и т. д.), а геологические границы характеризуются только геометрическими свойствами (формой и положением граничной поверхности).

С первых же попыток формализации операции выделения геологических объектов первичными были признаны геологические границы, а вторичными — геологические тела. Уже в первой монографии, посвященной формальному выделению геологических тел и границ [11], вначале определяется граница, а затем — геологическое тело (как связанная область, ограниченная со всех сторон границей). Принятие такого отношения (граница первична, тело вторично) было вполне в русле всей предшествующей геологической и геофизической литературы по этому вопросу. Напомним хотя бы рекомендации по выделению пластов в учебниках по промысловой геофизике. Задача выделения пласта считается равнозначной задаче определения его границ и этой задачей заменяется. Описание процедуры выделения пласта заменяется процедурой определения границы пласта.

Процедура выделения объекта важна не только в геологии, но и в других областях науки. Рассмотрим для примера задачу

распознавания зрительных образов. Как мы уже отмечали, эта область очень близка к проблемам распознавания образов в геологии и они взаимно обогащают друг друга.

В области автоматической обработки изображений на ЭВМ одна из кардинальных проблем — это выделение объектов на изображении. Обычно явно или неявно принимается тезис, что выделить на изображении тело означает задать его границы и в соответствии с этим задача выделения объектов заменяется задачей определения границ объекта. Границы объекта определяются в точках скачка яркости изображения. Поэтому во всех точках изображения вычисляется функция, характеризующая скачок яркости в ближайшей окрестности данной точки (например, градиент яркости \vec{g}). В простейшем случае черно-белого изображения (рис. 33) все точки со значениями градиента $|\vec{g}| > 0$ и составляют границу объекта. Однако даже для черно-белого изображения возможен несколько более сложный случай

(рис. 34). В этом случае уже не все точки с $|\vec{g}| > 0$ составляют границу изображенного объекта. Еще более сложная ситуация возникает при выделении объектов на полутоновом изображении (т. е. на изображении с достаточно большим диапазоном яркостей, например, на фотографии). В этом случае приходится устанавливать порог для значений модуля градиента яркости:

$|\vec{g}| > c$ (где c — константа). Это необходимо, по крайней мере, для того, чтобы избавиться от влияния шума — незначительных изменений яркости на изображении. Множество точек, в которых $|\vec{g}| > c$, рассматриваются как граничные. При этом возникает типичная ситуация. Если порог c взят малым, то все граничные точки объекта содержатся в этом множестве, но при этом в это множество входит большое число точек, которые не являются границами выделяемого объекта. Если порог c взят большим, то в множество граничных точек будут входить только граничные точки выделяемого объекта, но не все граничные точки объекта. Поэтому обычно при обработке сложных изображений приходится анализировать полученное множество граничных точек, отфильтровывать лишние точки и достраивать недостающие. Идя по такому пути, не удастся удовлетворительно решать задачи выделения объектов на естественных изображениях.

Как видно из изложенного, подход к выделению объектов на изображении полностью идентичен подходу, принятому в гео-



Рис. 33. Квадрат



Рис. 34. Расколотый квадрат

логии. Более того, описание процесса выделения объектов на изображении полностью приложимо к геологическим задачам. В общем виде изображение задается функцией яркости на плоскости $\Phi(x, y)$. Точно в таком же виде можно задать на любом геологическом разрезе функцию какой-нибудь геологической характеристики (например, глинистости $\Gamma(x, y)$). Формально функция $\Phi(x, y)$ ничем не отличается от $\Gamma(x, y)$, а процедура выделения глинистых пластов ничем не отличается от процедуры выделения объектов на изображении. Если же в качестве изображения рассмотреть рентгенограмму грудной клетки, то сходство этих задач не оставляет сомнений. В дальнейшем мы еще вернемся к этой параллели и покажем, как решение одной задачи помогает решению другой.

Вернемся к геологии и поставим вопрос: что является первичным — геологическое тело или геологическая граница? Можно представить себе геологическое тело, не имеющее границ, т. е. занимающее все пространство. В практическом плане можно осуществлять воздействие на геологическое тело, не интересуясь его границами (например, при рытье ямы в глинистом обрыве). В некоторых ситуациях достаточно частичное знание границ (например, при бурении для проходчика существенны лишь глубина залегания и мощность пласта известняка в данном месте и вовсе не существенно, как далеко пласт простирается — на 10 м или на 10 км).

Геологическая граница не есть независимый объект, она неразрывна связана с геологическими телами. Нельзя представить себе геологическую границу в пустоте, в среде, где нет геологических тел, так же как и в среде, занятой единственным безграницным геологическим телом. Для существования геологической границы необходимо существование пространственных неоднородностей, различных геологических тел. Граница всегда есть граница между чем-то. Таким образом, мы пришли к ответу на поставленный вопрос: понятие геологического тела первично по отношению к понятию геологической границы. Странно лишь то, что, придя к такому естественному выводу, мы оказались в противоречии с традицией приписывания приоритета геологическим границам. Здесь важно отметить, что речь идет не о том, как геологи выделяют на картах, в разрезах и других ситуациях геологические тела, а о том, как теоретики пытались описать этот процесс.

Примечательно, что в работе [23] на первых страницах книги автор следует формальным определениям и утверждает: «геологические тела представляют собой части пространства, ограниченного геологическими границами». Однако в конце книги, когда изложение формализмов уступает место содержательному анализу, автор говорит: «при выделении разностных (в том числе нарушенных) и условных тел всех классов в основу кладется совокупность вещественных, геометрических или генетических признаков, характеризующих то или иное тело, и уже на

основании распространения этих признаков проводится граница тела; *тело здесь стоит на первом месте, граница на втором*» (курсив мой, Ш. А. Губерман). И далее автор очень метко отмечает, что в новой глобальной тектонике плиты выделяются по своим границам (сейсмофокальным зонам) и это делает несостоятельным понятие плиты как единого геологического тела. «В тектонике плит, в основном структурном русунке, определяемом сейсмофокальными зонами, главное место занимают эти зоны, а не промежуточные участки земной поверхности (коры, литосферы), называемые плитами. Заметим, что понятие «литосферной плиты» не несет никакого определенного структурно-геологического и историко-геологического содержания. Так, в Индо-Австралии, а также в Северной и Антарктической плитах заключаются участки платформ, щитов, геосинклинальных систем и тонких океанических плит». Таким образом, автор считает совершенно неудовлетворительным путь «от границ к телам». Логика геологического анализа подтверждает первичность геологических тел по отношению к геологическим границам.

Такой подход естественно переносится и на задачи выделения объектов на изображении и, по-видимому, на аналогичные задачи в других областях. Однако, когда мы выделяем на изображении объекты, это еще не означает, что мы полностью определили их границы. Такая же ситуация наблюдается и в геологии. Ю. А. Косыгин отмечает, что «Тихоокеанская плита выделяется вполне отчетливо, но ее границы неравнозначны» [23]. В. Морган также отмечает, что границы блоков Сибири и Центральной Азии очень неопределенные.

Итак, представляется разумным разделить проблемы выделения объекта и определения его границ и поставить на первое место задачу выделения объектов. После того как решена задача выделения объектов, задача определения границ объектов в корне трансформируется. Раньше предполагался поиск *границ вообще* (а затем лишь выяснение того, что границы ограничивают), теперь же ставится задача определения *границ определенного объекта*. Можно предположить, что в практике геологической работы с каротажными диаграммами, геологическими колонками и другими документами объекты выделялись интуитивно, внимание на этом этапе не фиксировалось. А вот вопрос определения границ геологических тел требовал всегда пристального внимания, а иногда и специальных теоретических представлений. Например, весьма критичным является определение границ пласта для целей интерпретации данных каротажа. Пусть к кровле песчаного пласта низкого сопротивления примыкает участок высокого электрического сопротивления. Если этот участок принадлежит песчаному пласту, то повышение электрического сопротивления можно интерпретировать как нефтеносный интервал. Если этот участок не включается в пласт, то пласт трактуется как водоносный, а пропласток высокого сопро-

тивления интерпретируется, например, как уплотненный алевролит или известняк.

Теперь после предварительного обсуждения проблемы выделения геологических объектов необходимо ее конкретизировать. Выделение геологических объектов составляет непрерывную часть огромного количества геологических работ. Поэтому создание автоматизированных систем обработки геологических и геофизических данных требует разработки алгоритмов выделения геологических объектов. При оценке качества работы этих алгоритмов необходимо потребовать, чтобы они выделяли объекты не хуже человека. Чтобы достичь этой цели, необходимо в первую очередь попытаться понять, как это делает человек. Поскольку геологические объекты выделяются на основании обработки зрительной информации, необходимо учитывать знания, накопленные в области психологии зрительного восприятия, и на базе этих знаний попытаться перевести неформальный процесс выделения объектов в формальный алгоритм.

Огромный вклад в исследование законов зрительного восприятия внесли в начале XX в. В. Келер, М. Вертгеймер, К. Коффка — создатели гештальтпсихологии [37]. Общеизвестно, что их заслугой является постановка вопроса об ограниченности аналитического подхода в исследовании сложных систем. Основное внимание они уделяли тезису: целое не сводится к сумме его частей, а интерпретация каждой части зависит от целого. Механизмы, которыми сторонники теории гештальтпсихологии пытались объяснить этот феномен, были излишне физикалистскими и теперь представляют только исторический интерес. Сама же проблема целостности получила дальнейшее развитие, особенно в области зрительного восприятия.

Поскольку машинные системы обработки изображений чаще всего предназначены заменить человека в какой-то деятельности, результаты их работы должны копировать (в определенных аспектах) результаты восприятия того же изображения человеком. Достигнуть этого нелегко, поэтому делаются попытки воспроизвести не только результаты, но и методы переработки зрительной информации. Отсюда такое пристальное внимание со стороны математиков и инженеров, занимающихся машинным зрением (и вообще проблемами искусственного интеллекта), к психологии зрительного восприятия. Имеется, конечно, и встречный интерес нейрофизиологов и психологов к алгоритмам машинной обработки изображений, ибо новый язык, новая система понятий могут по-новому осветить старые проблемы. Однако продуктивность такого воздействия сильно зависит от уровня сложности тех задач, которые доступны системам машинного зрения. На сегодня, к сожалению, этот уровень достаточно низок.

При попытке обработать на машине сложное изображение мы сталкиваемся с основной проблемой гештальтпсихологии — проблемой соотношения объекта и фона, объекта и остального

изображения, части и целого. В области машинного зрения эти проблемы формируются как вопросы опознания объектов, выделения их, интерпретации фрагментов изображения. В настоящее время преобладает подход, по которому поиск объектов заменяется поиском границ объектов. В свою очередь, эта задача сводится к поиску границ вообще с последующим анализом границ и выбором подходящих по заранее заданным критериям. Наконец, поиск границ сводится к поиску отдельных точек, кандидатов в границы. Из них формируются линии, удовлетворяющие некоторым общим условиям (обычно задаются максимальной кривизной границы и ее минимальной длиной). Качество точки как граничной точки определяется градиентом или лапласианом. Таким образом, процедура выделения границ базируется на существенно локальной основе и носит выраженный иерархический характер.

В противоположность этому, процедура выделения объектов имеет нелокальный характер и является целостной. Решение о том, какой фрагмент изображения выделить как объект и как его интерпретировать, зависит от всего остального изображения.

Необходимость целостного подхода при обработке изображений признается всеми, однако практически в этом направлении мало что сделано. Дело в настоящее время обстоит таким образом, что большинство работ по машинному зрению посвящено обработке изображений, полностью или почти полностью лишенных целостности (сцены из кубиков, треки частиц, буквы и цифры и т. п.). Более сложные изображения (пейзаж, уличная сцена, космические снимки, рентгенограммы) используются лишь как иллюстрации работы тех или иных операторов. Как правило, они работают на таких изображениях неудовлетворительно.

Одно из важнейших преимуществ моделирования на вычислительной машине в том, что она ставит перед исследователем жесткие вопросы и требует на них исчерпывающего ответа. Пусть восприятие части изображения зависит от всей картины в целом. Как реализовать это положение в виде программы? Изображением для программы является множество значений яркостей в дискретных точках изображения (матрица яркостей). Частью изображения будем считать любое связное множество элементов матрицы. Под восприятием этой части будем понимать ее интерпретацию, т. е. отнесение этой части к одному из заранее заданных классов объектов (призма, самолет, человек, ребро, пласт и т. п.). Наконец, при интерпретации данной части мы должны учитывать также и всю остальную картину. Возникает вопрос: в какой форме мы должны учитывать остальную картину? В самом полном виде эта информация может быть представлена в виде функции яркости остальной части картины (фактически в виде набора яркостей в конечном множестве точек). Однако использовать ее в такой

форме невозможно. Можно описать остальную часть изображения как сумму объектов. Однако мы не можем определить объекты, так как выделение каждого из них связано с остальной частью изображения и мы попадаем в порочный круг. Возможен итеративный процесс: объекты выделяются локально, а затем переинтерпретируются в зависимости от остальной картины на данном шаге. Формально мы достигаем того, чего добивались — интерпретация каждого объекта зависит от остальной части изображения, но можем не получить правильного решения из-за неверной начальной интерпретации.

Ни один из рассмотренных путей не дал удовлетворительного решения. Причина неудачи, очевидно, заложена в самой постановке проблемы — вначале выделяем нечто, а затем интерпретируем это нечто. Правильной, возможно, является другая посылка: выделение объекта и его интерпретация должны происходить одновременно и для всего изображения. Объектом можно назвать то, что имеет разумную интерпретацию, а разумной можно назвать такую интерпретацию, которая согласована с интерпретацией всех объектов. Ниже будет рассмотрен один из алгоритмов, реализующих такой подход. Здесь же отметим, что в одной из задач распознавания — задаче чтения рукописного текста — имела место такая же смена посылок [15]. Первоначально решалась задача распознавания рукописных букв. Предполагалось, что, создав программы распознавания отдельных букв, можно будет перейти к распознаванию слов естественным способом: слово делится на буквы, буквы идентифицируются. Иными словами, предполагалась знакомая уже схема: вначале выделяем объекты, а затем интерпретируем их. Подход этот был автоматически перенесен из другой, казалось бы, очень близкой задачи — чтения печатного текста. Однако в случае печатного текста задача разделения слова на буквы тривиальна, а в случае рукописного текста она оказалась чрезвычайно сложной. Удовлетворительное решение проблемы было найдено, когда операции выделения объекта и его интерпретации были совмещены. Это было достигнуто следующим образом. Буквы и слова представляются как последовательность небольшого числа элементов траектории пера. Последовательность этих элементов в слове разбивается на подпоследовательности так, чтобы каждая из них и все одновременно были разумными, т. е. были буквами. Аналогичный подход желательнее было бы реализовать применительно к более сложным изображениям.

§ 2. АЛГОРИТМ НЕЛОКАЛЬНОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Опишем алгоритм, с помощью которого попытаемся промоделировать способность нашего зрительного восприятия пренебрегать подробностями картины, и по этой причине он получил условное название «к черту подробности» (КЧП) [42].

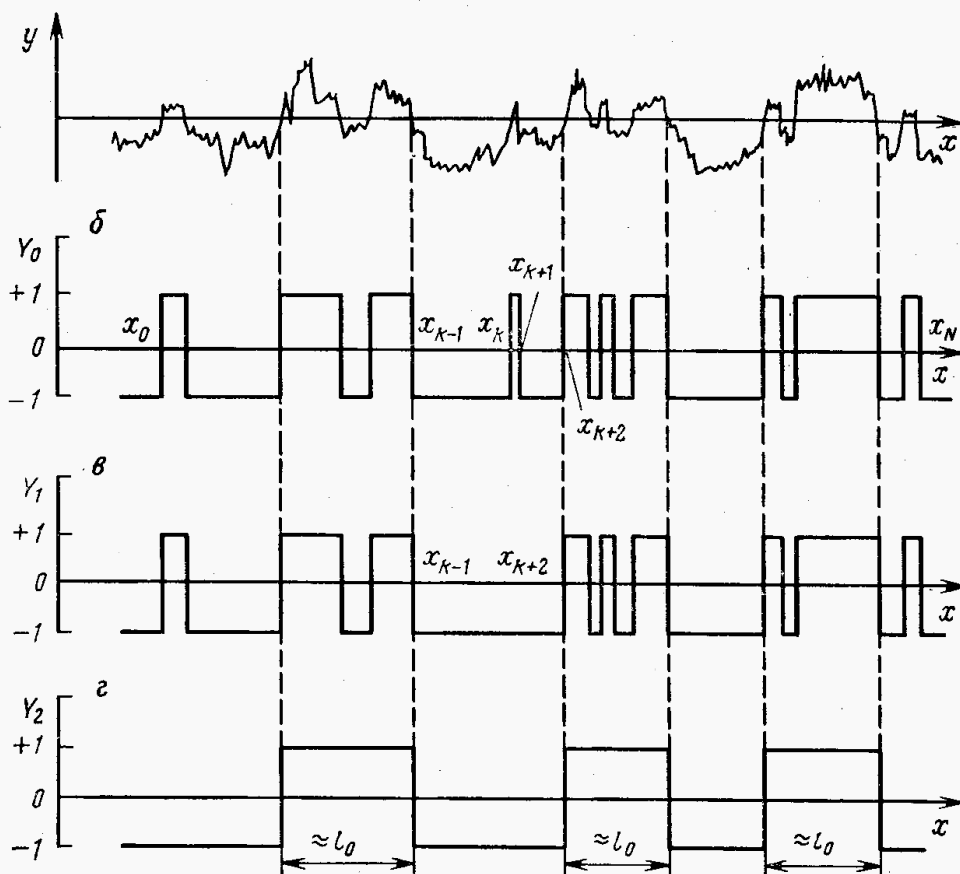


Рис. 35. Разбиение кривой $y(x)$

Рассмотрим сначала его работу в случае одномерного изображения (плоской кривой). Кривая $y(x)$ (рис. 35, а) пересекает ось x в точках x_0, x_1, \dots, x_N . Эти точки — [нули функции¹ $y(x)$] — задают ее огрубленное описание, которое сохраняет информацию о точках перемены знака функции $y(x)$, но пренебрегает отклонением $y(x)$ от нуля. Это огрубленное описание функции $y(x)$ можно представить в виде функции $Y_0(x)$ (рис. 35, б), меняющей знак в точках x_0, x_1, \dots, x_N и принимающей постоянные значения (например, $+1$ или -1).

Число интервалов между нулями функции $y(x)$ равно N . Находим самый короткий из этих интервалов. Пусть это будет интервал (x_k, x_{k+1}) длиной l_1 . Произведем операцию стирания самого короткого интервала. Для этого из множества нулей исключим границы этого интервала x_k и x_{k+1} . В результате вместо трех интервалов (x_{k-1}, x_k) , (x_k, x_{k+1}) и (x_{k+1}, x_{k+2}) образуется один интервал постоянного знака (x_{k-1}, x_{k+2}) (рис. 35, в).

* В более общем случае необходимо рассматривать нули функции $y(x) - y_l(x)$, где $y_l(x)$ — среднее на интервале длиной l с центром в точке x .

Затем повторяем операцию стирания самого короткого из оставшихся интервалов (длиной $l_2 \geq l_1$) и так действуем до тех пор, пока не сотрем все интервалы между нулями.

Построим теперь функцию $n(l)/N$, где $n(l)$ — число интервалов, оставшихся после стирания интервалов длиной l . Функция $n(l)/N$ равна 1 при $l=0$, она уменьшается скачком на величину $2/N$ при всех значениях l , равных длине минимального интервала на каком-нибудь шаге процесса стирания интервалов, и сохраняет постоянное значение между ними. Иными словами, это кусочно-постоянная монотонно убывающая функция. Можно выделить два случая: 1) функция $n(l)$ падает равномерно, 2) $n(l)$ падает скачками, образуя большие ступени. Короткие интервалы быстрого падения сменяются длинными интервалами постоянства $n(l)$. Наличие ступени у функции $n(l)/N$ соответствует следующим свойствам исходной функции: а) на i -м шаге процесса стирания коротких интервалов образовалось несколько интервалов приблизительно одинаковой длины (l_0); б) после их стирания оставшиеся интервалы имеют длину, превышающую l_0 в несколько раз; в) длина интервала, стертого на $i-1$ -м шаге, в несколько раз меньше l_0 . Функция $n(l)/N$, построенная для кривой $y(x)$, имеет такой же ступенчатый характер (рис. 36). Положение ступеньки определяет характерный размер деталей на кривой l_0 , а разбиение, в котором отсутствуют все детали меньше l_0 , выделяет на кривой характерные объекты. На кривой $Y_i(x)$ выделяются три объекта длиной приблизительно l_0 (см. рис. 35, г), хорошо выделяемые и зрительно на исходной кривой $y(x)$. Наличие ступеньки на кривой $n(l)/N$ является формальным критерием того, что на кривой имеет смысл выделять объекты. Чем ярче выражена ступенчатость кривой $n(l)/N$, тем более организована исходная кривая (организованность функции понимается в смысле Гельфанда — Цетлина: свойство функции большого числа переменных описывается небольшим числом параметров [32]).

Описанный алгоритм выделения объектов является не-локальным, так как вопрос о том, является ли данный интервал содержательным объектом или нет, решается в зависимости от размеров всех других выделяемых объектов. Одна и та же часть кривой может или оказаться объектом, или нет в зависимости от контекста, т. е. от остальной части кривой. Важно, что критерий существования объектов [наличие ступени функции $n(l)$] является внутренним, а не задается извне.

В двумерном случае функция яркости задана на плоскости как функция двух координат (полутоновое изображение). Аналогом нулей одномерной функции в этом случае являются линии нулевого уровня функции яркости (за вычетом среднего значения) $\Phi(x, y)$: Линии нулевого уровня разграничивают относительно светлые и темные области изображения. Операция исключения подробностей заключается в стирании светлой (или темной) области минимальной площади.

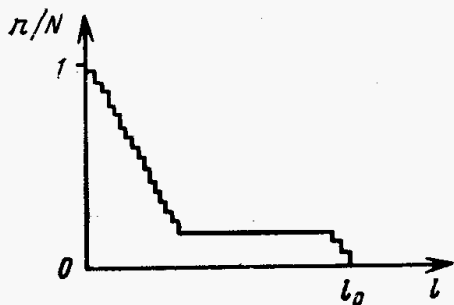


Рис. 36. График $n(l)/N$



Рис. 37. Расчленение кривой ГК с помощью алгоритма КЧП

На рис. 37 кривая представляет геофизический разрез скважины: зависимость естественной радиоактивности пород от глубины залегания (за вычетом среднего значения). На кривой отражено чередование песчаных и глинистых пород. Глинистые породы обладают повышенной радиоактивностью, песчаные — пониженной. Наиболее крупные образования в разрезе — пачки пластов. Песчаная пачка содержит в основном песчаные породы, но содержит и глинистые пласты. Глинистые пачки могут содержать и песчаные пласты. Пласты, в свою очередь, осложнены пропластками иного состава. Такое трехуровневое строение разреза отражается на кривой $n(l)$ наличием трех ступенек (см. рис. 39). Различные ступеньки соответствуют различным уровням грубости описания кривой (а тем самым геологического разреза). В разных задачах осмысленным оказывается описание разреза с различной степенью грубости. При планировании темпов бурения скважин достаточным оказывается самое грубое описание разреза (разделение на песчаные, глинистые и карбонатные пачки). Такое же грубое описание может быть использовано при прогнозных подсчетах запасов нефти и газа в масштабе бассейна. Описание разреза на следующем уровне подробности (на уровне выделения пластов) соответствует задачам корреляции разрезов скважин и подсчета запасов полезного ископаемого в пределах месторождения. Самое подробное описание разреза необходимо, например, в задаче разработки режима эксплуатации месторождения.

Важно подчеркнуть, что не каждая кривая обладает высокой степенью организованности (т. е. имеет функцию $n(l)/N$ с ярко выраженным ступенчатым характером). Соответственно не для каждой кривой можно указать устойчивые разбиения, т. е. представить кривую в разумно огрубленном виде. Ко-

нечно, для каждой кривой можно провести формальное огрубление, а именно исключить из описания все интервалы, мощность которых меньше произвольной константы l_0 . Однако такое огрубление кривой недопустимо (без специальных оговорок), и вот по какой причине. Когда геолог или геофизик получает огрубленное описание разреза, то он полагает, что это огрубление проведено разумно, а следовательно, выполняется следующее условие: если в описании разреза минимальная мощность пласта составляет l_0 , то: 1) при огрублении были исключены из описания лишь пласты мощностью много меньше l_0 , 2) нет в разрезе пластов, близких по мощности к l_0 , 3) из описания не исключены пласты мощностью приблизительно l_0 или больше l_0 . Таким образом, *разумное огрубленное описание содержит в себе меру своего огрубления*. В несколько более общих терминах это свойство разумного огрубленного описания можно выразить так: в разумном огрубленном описании должны быть представлены или все объекты данного уровня описания, или ни одного.

Теперь ясно, что формально проведенное огрубление (исключение объектов мощности меньше произвольного l_0) представит описание, которое будет неверно воспринято, а именно, оно будет воспринято как разумное, следовательно будет сделан вывод об отсутствии в разрезе пластов по мощности, близких к l_0 (кроме тех, которые указаны в описании). На этом основании, например, может быть подсчитана суммарная мощность коллекторов в разрезе в предположении, что суммарная мощность опущенных пластов сравнительно мала, или в предположении, что пропущенные пласты с гораздо меньшей мощностью обладают и ухудшенными коллекторскими свойствами. На практике, если используемое описание является не разумным, а формальным, суммарная мощность коллекторов будет подсчитана с большой ошибкой, ибо из описания исключены были пласты с мощностью, близкой к l_0 .

При использовании локальных методов выделения границ, например метода градиента, возникает следующая ситуация. Если порог градиента выбрать высоким, то все отобранные точки будут действительно границами объектов, но много границ будет потеряно. Если порог выбрать низким, то все объекты будут выделены, но будет выделено много ложных границ. Нелокальный алгоритм КЧП позволяет более адекватно выделять границы объектов, не задавая априорных порогов.

Можно сказать, что алгоритм КЧП реализует изложенные выше предпосылки: 1) выделение объекта и его интерпретация происходят одновременно и для всего изображения, 2) объектом является то, что имеет разумную интерпретацию, а разумной считается такая интерпретация, которая согласована с интерпретацией всех других объектов.

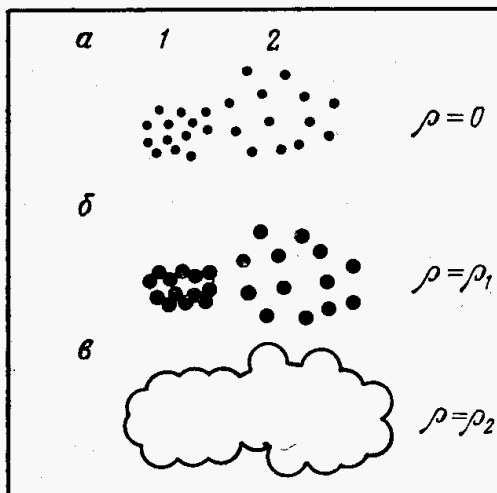


Рис. 38. Функция $\Phi(x, y)$ при различных ρ

зительно ограничивают объект. Задача определения фактических границ оказывается самостоятельной задачей. Нужно отметить, что эта проблема (по крайней мере, в геофизике) хорошо разработана. При обработке каротажных кривых (кривая ПС) граница смещается в ближайшую точку максимального градиента: для кривой градиент-зонда — в точку ближайшего максимума, для кривой ГК — в ближайший минимум (в подошве пласта).

И цели и терминология алгоритма КЧП близки геологическим представлениям. Ю. А. Косыгин утверждает, что расчленение разреза есть разбиение геологического пространства (в данном случае одномерного) на геологические тела; при расчленении разреза и выделении в нем одномерных геологических тел следует руководствоваться представлениями об иерархии геологических объектов. В этом утверждении в качестве цели ставится выделение тел (а не границ), в качестве способа — разбиение, в качестве модели — система тел различного уровня иерархии. Ю. А. Косыгин указывает также на ведущую роль размеров в расчленении геологических толщ: при геологическом районировании, связанном с выделением структурных элементов (например, расчленение толщ или стратификация разрезов скважин), важно соблюдение принципа соразмерности (иными словами, важно, чтобы структурные элементы имели близкие размеры). И наконец, он указывает на то, что выполнение принципа соразмерности при расчленении разреза является синонимом разумности этого разбиения: вряд ли имеет смысл разбивать пространство на слишком различающиеся по размерам элементы — на слои мощностью 1 км и 1 мм. Из приведенного следует, что алгоритм КЧП почти полностью повторяет существовавший и существующий в геологии подход к задаче расчленения разрезов. Смушает лишь одно:

Особенность данного алгоритма — выделение не просто границы, а всегда границы объектов. Поэтому в одномерном случае границы разного знака (т. е. имеющие градиент разного знака) всегда чередуются, т. е. все объекты полностью определены своими границами. В двумерном случае это означает, что все границы оказываются замкнутыми и каждая определяет объект.

Другая особенность алгоритма КЧП заключается в том, что полученные им границы не являются истинными границами объекта; они лишь прибли-

геологическая литература так богата и противоречива, что в ней можно найти (по частям) описание любого мыслимого алгоритма.

Алгоритм КЧП настолько прост, что его недостатки очевидны.

1. Если минимальной длиной обладают несколько интервалов, то результат может зависеть от очередности исключения интервалов.

2. При исключении интервалов (или областей) постоянного знака учитывается только длина (или площадь) области и не учитываются значения функции в области.

3. Алгоритм не учитывает разницы между четкими и размытыми границами.

4. Если изображения объектов, дающих аномалии одного знака, налагаются друг на друга, то КЧП не может выделить границу между объектами.

Рассмотрев отдельно задачу выделения геологических объектов, мы пришли к выводу, что задача эта нелокальная и решение о выделении объекта в данном интервале разреза принимается с учетом информации об остальной части разреза. Очевидно, этим объясняется, почему при всех построениях формальной процедуры выделения геологических тел за исходный шаг выбиралось построение границ: оно опирается на известные локальные процедуры вычисления скачка функции $\Phi(x, y)$ в точке и связывания соседних граничных точек [точек, в которых $|\text{grad } \Phi(x, y)| > C$]. Выделение же объектов требует подходящих нелокальных процедур, которые к тому времени не были разработаны.

Итак, можно сказать, что алгоритм КЧП (правда, частично и лишь на самом низком уровне) реализует основную идею гештальтпсихологии — зависимость локального решения от общей картины.

Сформулируем основные идеи алгоритма КЧП.

1. Разделение целого на части и интерпретация этих частей производится одновременно.

2. Описание любой части должно вестись в терминах, приложимых ко всем основным частям.

3. Разбиение производится не путем полного перебора элементов, а упорядоченным рассмотрением сильно ограниченного класса разбиений.

4. Цель разбиения — выделение осмысленно огрубленного описания.

5. Осмысленно огрубленное описание предполагает присутствие всех элементов данного уровня описания и отсутствие всех элементов более низких уровней.

Эти идеи имеют важное значение не только для решения задачи выделения геологических тел. Мы уже указывали на то, что алгоритм КЧП с успехом применен при решении очень сложной задачи автоматического анализа флюорограмм грудной

клетки [6]. Он был также использован при анализе распределения плотности галактик во вселенной, однако значение этого алгоритма выходит за рамки использования его в практических задачах. В последние десятилетия в различных областях знания обострилась проблема нелокальной интерпретации данных, проблема целостности. Далее мы покажем, как идеи, реализованные в алгоритме КЧП, помогают решению этой проблемы.

§ 3. КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ

Имеются некоторые области исследования, занимающиеся описанием точечных множеств, т. е. множеств, состоящих из точек в n -мерном пространстве. Первая из них известна под названием кластерного анализа. Задача кластерного анализа — разумное сокращение описания заданного точечного множества. Сокращение описания происходит за счет того, что описание каждой отдельной точки в виде набора n координат заменяется одним числом — номером кластера (или кучи), к которому принадлежит точка. Оценка разумности полученного разбиения на кучи в конечном счете может быть получена только в рамках задачи более высокого уровня, для которой задача разбиения на кучи является подзадачей: если полученное сокращенное описание помогает построить решение вышестоящей задачи, то оно приемлемо. Этот принцип реализован, например, в работах по распознаванию картинок. Существуют субкритерии разумности разбиения на кучи внутри самой задачи, например отношение среднего расстояния между точками внутри куч \bar{r}_i к среднему расстоянию между точками, принадлежащими двум разным кучам \bar{r}_{ij} . Очень часто задача, удовлетворяющая внутреннему критерию (субкритерию), удовлетворяет и внешнему критерию. Однако главная проблема не в поиске подходящего субкритерия, а в поиске разбиения, на котором он максимизируется. Многие методы сводятся к многократному перебору и очень громоздки.

Второй областью, в которой рассматриваются точечные множества, является распознавание образов. В задачах распознавания адекватное описание точечных множеств необходимо при постановке задачи (например, определении числа распознаваемых классов), при выборе схемы решения (например, на первом шагу типизация, а затем лишь распознавание), при определении области отказов.

Третья область — психология зрительного восприятия. Пристальное внимание к задачам восприятия точечных изображений (частный случай точечных множеств на плоскости) проявили основатели гештальтпсихологии [37]. Они рассматривали восприятие точечных множеств как пример целостного восприятия (т. е. восприятия, в котором интерпретация части изображения зависит от всей остальной картины) и сформулиро-

вали некоторые принципы организации кластеров (по близости, по сходству, по общей судьбе).

В последние два десятилетия все три области сблизились. С одной стороны, алгоритмы кластеризации базируются на принципах организации кластеров на плоскости при восприятии человеком (например, используя критерий близости) и переносят их в задачи большей размерности. С другой стороны, психологи используют программы для ЭВМ с целью формулировки и проверки моделей восприятия.

Изложенный выше алгоритм КЧП и порожденная на его основе интерпретация проблем гештальтпсихологии позволяют предложить алгоритм кластерного анализа, основанный на тех же принципах. В алгоритме КЧП центральным является построение функции $n(l)/N$. Для анализа точечных множеств алгоритм вычисления аналогичной функции следующий. Пусть дано множество точек на плоскости (см. рис. 38, а). Каждая точка становится центром круга радиуса ρ . Определим $\Phi(x, y)$ следующим образом: $\Phi(x, y) = 1$ внутри каждого круга и $\Phi(x, y) = -1$ вне этих кругов. На рис. 38, а и б круги закрашены черным. При достаточно малом ρ ($\rho < \rho_0$) число связных областей n [где $\Phi(x, y) = 1$] равно числу точек N на исходном изображении (рис. 38, а). С увеличением ρ круги начнут пересекаться и число n связных областей, в которых $\Phi(x, y) = 1$, будет уменьшаться. Функция $n(\rho)/N$ представлена на рис. 39.

Анализ кривой $n(\rho)/N$ производится так же, как и в алгоритме КЧП, и позволяет выделить устойчивые огрубленные описания точечных изображений. На кривой ясно видны две ступеньки. Кривая быстро падает при росте ρ от ρ_0 до ρ_1 . Это связано с тем, что круги вокруг точек 1-й кучи сливаются в одно связное множество (см. рис. 38, б). Затем следует пологий участок кривой, после которого следует быстрый спад, вызванный слиянием кругов вокруг точек 2-й кучи. При $\rho = \rho_2$ все точки 2-й кучи сливаются в одно связное множество (см. рис. 38, в).

Таким образом, анализ кривой $n(\rho)/N$ позволяет разделить множество точек на две кучи, что согласуется со зрительным восприятием данного изображения.

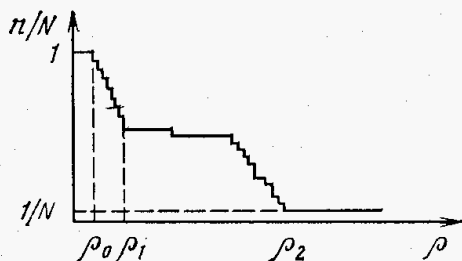


Рис. 39. График $n(\rho)/N$ для рис. 38

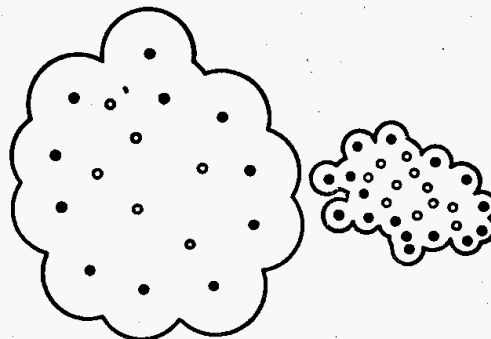


Рис. 40. Граничные точки кластера

Данный алгоритм кластерного анализа естественно обобщается как на одномерный случай (поиск скоплений точек на прямой), так и на трехмерный случай и случаи более высокой размерности. Важная особенность этого алгоритма — то, что он содержит внутренние критерии организации множества точек.

Выделение граничных точек. Пусть в результате работы алгоритма выделен кластер при $\rho = \rho_0$ (рис. 40). Объединение всех кругов радиусом ρ_0 назовем носителем кластера. Границу носителя назовем границей кластера. Эта граница состоит из дуг окружностей. Центрами этих дуг являются точки кластера. Множество этих точек и составляет границу кластера. Данное определение множества граничных точек можно несколько обобщить. Можно считать граничными те точки, которые являются центрами только тех дуг, составляющих границу, размер которых α больше заданного α_0 . Данное ранее определение оказывается частным случаем более общего (при $\alpha_0 = 0$).

Определение границы кластера и граничных точек кластера тривиально обобщается на случай большей размерности. Примером геологической задачи, в которой необходимо выделение граничных точек, является выделение крайних скважин на месторождении для организации законтурного заводнения. Заметим, что задача выделения границы точечного множества естественно решается после выделения кластера, т. е. и в случае точечных множеств выделение объекта является первичным, а определение границ — вторичным.

Определение размерности кластера. При исследовании кластеров важно различать (например, на плоскости) цепочки точек и кучи точек (рис. 41), одномерные и двумерные кластеры. Первый способ различения этих кластеров заключается в определении внутренних точек, т. е. точек, не являющихся граничными. В случае цепочки все точки кластера являются граничными. В случае кучи в кластере имеются внутренние точки.

До сих пор термины «кластер» и «кучи» использовались как синонимы. Однако между ними есть различие. Кластеры являются более общим понятием. По М. М. Бонгарду, который ввел термин «развал на кучи», точки в куче объединены по близости с тем, чтобы их можно было характеризовать не набором всех параметров, а более кратко — номером кучи. Естественно, что такой подход неприемлем для цепочек: в цепочку могут входить точки, очень далекие по своим характеристикам.

Второй способ различения цепочек и куч связан с модификацией алгоритма развала на кучи. В алгоритме, основанном на алгоритме КЧП, фигурирует расстояние до ближайшего «соседа» ρ_1 , с которым данная точка объединяется, когда параметр ρ достигает $\rho_1/2$. Некоторое обобщение алгоритма заключается в том, чтобы в качестве характеристики рассматривать разность расстояний $\Delta_i = \rho_1 - \rho_i$, где ρ_i — расстояние от

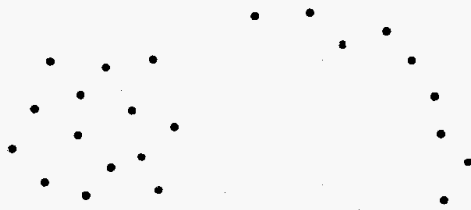
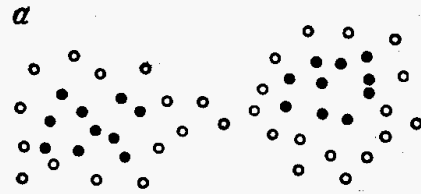
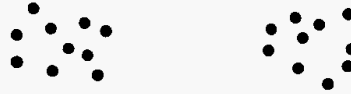


Рис. 41. Одномерный и двумерный кластеры



а



б

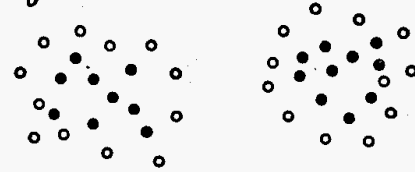


Рис. 42. Разъединение кластеров

данной точки до i -й из точек, упорядоченных по возрастанию расстояния. Δ_2/ρ_1 , как правило, мало в кластерах, содержащих более двух точек. Величина Δ_3/ρ_1 мала в кучах, но имеет значение приблизительно 1 в цепочках (для идеальной цепочки, состоящей из точек на прямой, отстоящих друг от друга на равные расстояния, Δ_3/ρ_1 в точности равно 1). Для внутренних точек кластера в трехмерном случае величина Δ_i/ρ_1 будет мала до значения $i=5 \div 7$.

Определение размерности кластеров важно в случае, изображенном на рис. 42, а. Формально здесь выделится один кластер ($\rho = \rho_0$), однако интуитивно ясно, что хотелось бы в этом случае выделить два кластера, соединенные цепочкой. Чтобы формально обнаружить такую ситуацию, можно воспользоваться тем, что все точки, принадлежащие цепочке, являются граничными. Проведем операцию стирания граничных точек кластера. В данном случае остатки кластера (ядро кластера) окажутся двумя отдельными кластерами (рис. 42, б). Тем самым устанавливается факт наличия двух кластеров. После этого можно провести операцию «наращивания» — присоединения к ядрам кластеров тех граничных точек исходного кластера, которые находятся от точек ядра на расстоянии, не превосходящем ρ_0 (того расстояния, которое определило формирование исходного кластера). Полученные кластеры и считаются решением задачи (рис. 42, в).

§ 4. АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Гештальтпсихология является одной из ближайших предшественниц и составных частей общей теории систем. По признанию основоположника общей теории систем Л. фон Бергаланфи

очень близко подошел к генерализации теории гештальтпсихологии в общую теорию систем В. Келер [1]. Близость этих двух теорий определяется тем, что в основе как той, так и другой лежит понятие целостности. Попытаемся с помощью алгоритма КЧП, который реализует принцип целостности для частного случая обработки изображений, проанализировать понятие целостности в более широком аспекте, прежде всего в аспекте развития системного подхода.

Целостность

Основатель общей теории систем Л. фон Бергаланфи писал, что аристотелевское положение «целое больше суммы его частей» до сих пор остается выражением основной системной проблемы [1]. В. Н. Садовский [31] считает, что и исторически и логически понимание объекта исследования как системы органически связано с осознанием его как определенной целостности, некоторого целого. Основная черта системы — целостность, утверждают Ю. А. Шрейдер и А. А. Шаров [39]. Несмотря на исключительную важность понятия целостности и для гештальтпсихологии и для теории систем, эти восходящие к античности формулировки не удавалось конкретизировать, перевести в разряд формальных определений. Спустя два десятилетия бурного развития теории систем В. Н. Садовский отметил, что найти оперативные способы задания целостности систем не удалось [31].

Мы будем далее исходить из того, что понятие целостности сводится к двум утверждениям: 1) целое не сводится к сумме своих частей; 2) часть зависит от целого. Попытаемся использовать изложенный выше алгоритм нелокального выделения объектов, реализующий частный случай целостного подхода, для разъяснения и конкретизации этих двух утверждений.

Начнем с утверждения «часть зависит от целого». В отличие от первого утверждения — негативного — это утверждение позитивно. Выше было показано, что для реализации целостного подхода в виде программы необходимо реализовать именно этот принцип. Трудность его реализации заключается в том, как представить целое. Если целое представить в виде суммы частей, то мы попадаем в порочный круг. Выход состоит в том, что все части целого интерпретируются одновременно, причем так, чтобы они составляли вместе осмысленное целое. С этой точки зрения мы можем уточнить утверждение «часть зависит от целого». Мы понимаем это в контексте теории систем не как утверждение, что часть буханки хлеба есть хлеб. В этом случае любая часть буханки есть хлеб. В интересующем нас смысле рассматриваемое утверждение означает, что выделение данного фрагмента как части должно быть согласовано со всеми другими выделенными частями так, чтобы вместе они составляли нечто разумное.

В последней формулировке употребляется термин «разумное», которому, конечно, нельзя дать формальное определение и который предполагает существование разумного субъекта в процессе расчленения целого на части. Мы не рассматриваем такое положение как недостаток и считаем, что оно отражает ситуацию по существу. Это кажется вполне естественным для гештальтпсихологии, которая является теорией человеческого восприятия, но может показаться спорным для теории систем, которую трактуют как абстрактную теорию. В действительности же многие признают присутствие субъекта в системном исследовании. Вот некоторые суждения на этот счет.

Л. фон Бергаланфи: «Выделение систем как в повседневных объектах нашего мира, так и в концептуальных конструкциях, определяется нашим «видением» или «восприятием» [1].

Ю. А. Шрейдер и А. А. Шаров: «целое представляется собранием компонентов (частей), причем такое представление не вполне детерминировано свойствами системы — оно может зависеть и от наблюдателя, выбирающего удобный способ представления... Первоначально открытое наблюдателю поле исследования принципиально аморфно, не расчленено... Сама возможность выделения в этом поле устойчивых объектов определяется некими целостными свойствами системы и способностью наблюдателя к восприятию образа» [39].

Г. Паск: «... Любая форма распределения активности в цепи, рассматриваемая каким-либо наблюдателем как закономерная, является системой» [31].

В описанном выше алгоритме КЧП понятие разумности было заложено априори. Разумным полагалось существование устойчивых (по размеру) разбиений функции на совокупность объектов. Применительно к одномерным и двумерным функциям этого оказалось достаточным для успешного решения многих задач. В других системах критерий разумности разбиения может быть иным и даже не единственным. В частности, Н. Ф. Овчинников [26] пронизательно утверждал, что поиск разбиения производится в соответствии с теми или иными заданными условиями исследования. Задание этих условий определяется исторически сложившейся системой знаний. Это задание не может определяться однозначным образом. Эта множественность включает в себе возможность произвольной интерпретации объекта познания.

Таким образом, при исследовании систем необходимо учитывать способ их восприятия, а следовательно, теория систем должна включать субъект как составную часть предмета исследования. Это делает еще более глубокой связь общей теории систем с гештальтпсихологией, которая есть теория восприятия человеком объективной действительности. Собственно кибернетика (на основе которой создан алгоритм КЧП) родилась из потребности включить человека в предмет исследования — теорию управления. Дальнейшее развитие кибернетики —

это цепь попыток понять и формализовать деятельность человека в различных задачах (теория игр, распознавание образов, коллективное поведение автоматов, медицинская диагностика, геологическое прогнозирование).

Теперь рассмотрим утверждение «целое не сводится к сумме его частей». С учетом изложенного более точно это утверждение звучит так: целое не сводится к сумме своих частей, интерпретируемых независимо. Очень часто взятые изолированно части изображения вообще не могут быть проинтерпретированы, а в разных контекстах обозначать различные вещи. Это хорошо видно на многих картинах импрессионистов. Однако, после того как целое разумно разделено на части и каждая часть проинтерпретирована в соответствии с целым, можно утверждать, что целое представляется совокупностью своих частей, таким образом выделенных. Лицо, например, определяется своими частями (глаза, нос, рот, уши, подбородок, волосы) и их взаимным расположением. Но каждая часть в отдельности не всегда может быть проинтерпретирована как нос, рот, ухо и т. д.

Аналогично обстоит дело при восприятии рукописного слова. Для его правильного восприятия необходим системный подход: слово должно быть разделено на части таким образом, чтобы все части одновременно имели разумную интерпретацию (т. е. были буквами данного языка) и целое (т. е. слово), составленное из этих частей (букв), было осмысленным. Например, слово «шиш» можно разделить на части таким образом «*i—ш—ш—i*» и таким «*и—ш—ш*». Однако первый вариант разбиения должен быть отвергнут, ибо некоторые его части (*i*) не являются буквами русского алфавита. Второй вариант должен быть отвергнут, ибо целое, составленное из выделенных таким образом частей, не является осмысленным словом. Единственным разбиением, удовлетворяющим системным требованиям, является разбиение «*ш—и—ш*». После того как слово разбито на части в соответствии с системными требованиями, оно полностью определяется своими частями (буквами).

Совершенно иная ситуация возникает, когда слово написано (или напечатано) печатными буквами. В этом случае нет задачи деления слова на части — оно уже разделено на буквы именно таким образом, что сумма его частей (последовательность букв) полностью определяет слово.

Изложенное понимание свойства целостности в большой мере совпадает с представлением Л. фон Бергаланфи, который писал, что свойства предметов и способы действия на высших уровнях не могут быть выражены при помощи суммирования свойств и действий их компонентов, взятых изолированно. Если, однако, известны ансамбль компонентов и существующие между ними отношения, то высшие уровни могут быть выведены из компонентов [1].

Таким образом, основной задачей системного подхода в исследовании объекта является членение целого на части.

Рассмотрим задачу разбиения на части, отталкиваясь от алгоритма КЧП и восприятия изображений. Изображение может быть разбито на произвольные фрагменты огромным числом способов. Среди них есть одно искомое разбиение (или несколько), удовлетворяющее системным требованиям (осмысленность каждой части и целого). Для нахождения этого особого разбиения необходимо решить две проблемы: 1) сформулировать критерий осмысленности разбиения, 2) избежать полного перебора возможных разбиений. В алгоритме КЧП эти проблемы решены следующим образом. Разумность разбиения определяется его устойчивостью, т. е. наличием нескольких объектов близких размеров. Избежать перебора всех возможных разбиений удастся благодаря выбору одного разбиения (путем превращения исходного изображения в черно-белое изображение с помощью функции $\text{sign}[\Phi(x, y) - \bar{\Phi}(x, y)]$ и рассмотрению ограниченного ряда производных разбиений, являющихся различными огрублениями исходного.

Попытаемся выразить критерий разумности, использованный в алгоритме КЧП (существование частей, обладающих одинаковым размером), в более общих терминах. Для этого используем работу Н. Ф. Овчинникова [26] (в ней введен термин «поиск разбиения»). Чтобы представить объект как систему, необходимо так или иначе расчленить объект, а затем констатировать существование отношений этих частей в целостной картине. Понятие части системы автор рассматривает как первоначальную ступень в процессе формирования понятия элемент структуры, а сами элементы выступают как тождественные. Если нет этой тождественности, то нет и структуры. В этих высказываниях Н. Ф. Овчинников рассматривает системное исследование объекта как процесс, в котором исследуются различные разбиения и выделяется то, в котором присутствует заданное (надо понимать разумное) отношение частей. Он ясно различает разбиение объекта на произвольные части и на части, удовлетворяющие системным требованиям (элементы). В приведенных высказываниях с поразительной точностью, хотя и в общих терминах, указаны особенности алгоритма КЧП.

Рассмотрим способы организации разбиений на изображениях. Начнем с простейшего случая точечных изображений. Все элементарные части этих изображений одинаковы — это черные точки. Различаются они только положением на плоскости. Восприятие кучи точек (рис. 43, а) уже целостное восприятие, а следовательно, системное восприятие. Точки в куче ничем не связаны, кроме относительной близости. Если посмотреть на кучу через небольшое окно, то точки внутри этого окошка «рассыпятся» (рис. 43, б). Таким образом, в точечных изображениях формируется разбиение на части по близости. Связывание по близости имеет под собой глубокую основу — все сигналы и

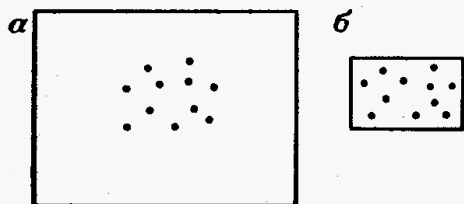


Рис. 43. Возникновение (а) и распад (б) кластера

силы взаимодействия быстро ослабевают с расстоянием, так что у близко расположенных элементов гораздо больше возможностей организовать взаимодействие и объединиться физически в одно целое.

Эти принципы гештальтпсихологии (объединение по близости и сходству элементов) имеют широкое применение. Например, представление об организации нервной системы базируется в основном на нейроанатомических данных и в основе своей имеет объединение нейронов в узлы, ядра, тела и т. п. по принципам сходства нейронов и их близости. Поэтому наше представление о нервной системе является системным. То же можно сказать о принципах описания геологических разрезов.

Итак, объединение элементов по близости и сходству — мощный способ выделения одного или нескольких разбиений объекта, позволяющий избегать перебора всех возможных разбиений при оценке их разумности.

Способ ограничения разбиений для полутоновых изображений реализован в алгоритме КЧП и описан выше. На базе исходного разбиения с помощью функции $\text{sign} [\Phi(x, y) - \bar{\Phi}(x, y)]$ строится последовательность вложенных друг в друга разбиений с помощью операции исключения минимальной подробности. Сам алгоритм КЧП возник как альтернатива способу разбиения функции $\Phi(x, y)$ с помощью статистических критериев. Статистический критерий различимости объекта и фона (например, разность средних значений) применялся для всех возможных разбиений области задания функции $f(x)$ на фон и объект. Выбиралось разбиение с наибольшей мерой различимости. Даже в случае небольшого и известного заранее числа объектов требовался очень большой перебор разбиений, подлежащих оценке. В случае функции двух или трех переменных перебор становился недопустимо большим. Предложенный алгоритм КЧП и был направлен на замену полного перебора разумно направленным перебором.

Рассмотрим теперь задачу чтения рукописного текста. В этой задаче удалось выделить восемь базовых элементов траектории пера, из которых строятся все рукописные буквы русского алфавита (как в канонической, так и в скорописной форме). Каждое слово рукописного текста может быть разбито на последовательность из базовых элементов. Это разбиение и принимается за исходное. На его основе строятся различные подразбиения путем объединения нескольких последовательных

элементов в группу. Разумность каждого разбиения оценивается по критериям, описанным выше: каждая группа элементов должна представлять букву, а последовательность полученных букв должна образовывать осмысленное слово. Удачный выбор базовых элементов, в частности, определялся и тем, что эти элементы оказались достаточно крупными и поэтому их общее число в слове невелико.

Итак, важнейшие этапы реализации системного подхода следующие: 1) выбор такого исходного разбиения объекта и операторов преобразования этого разбиения, которые резко ограничивают потенциально возможное число разбиений и содержат искомое разбиение; 2) формулировка критериев разумности для оценки рассматриваемых разбиений.

§ 5. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

Сформулируем кратко основные положения изложенной выше концепции системного подхода.

1. Системный подход исследования объектов есть особый способ их восприятия. В основе подхода лежит понятие целостности. Системный подход является расширением целостного способа восприятия объектов внешнего мира, данных нам в ощущениях на объекты любой природы. Если подход гештальтпсихологии является неосознанным способом целостного восприятия, присущим человеческой психике, то системный подход — осознанный способ целостного отражения реальности.

2. Целостность восприятия характеризуется тем, что интерпретация части зависит от целого.

3. Цель системного подхода в исследовании объекта — такое расчленение объекта на части, что каждая часть в отдельности и все вместе могут быть разумно проинтерпретированы. Для некоторых классов задач понятие «разумность» может быть формализовано (например, с помощью понятия «устойчивость»). Совокупность частей, выделенных таким образом, вместе с отношениями между ними определяет целое и описывает его. Таким образом, целью системного подхода можно считать описание объекта исследования.

4. Системный подход применим для описания не только сложных, но и простых объектов. Сложность не является необходимым условием системного подхода. И наоборот, описание сложных объектов не требует обязательного использования системного подхода. Сложность и системность не являются сопоставимыми понятиями, поскольку сложность относится к объекту исследования (число элементов и их отношений), а системность — к способу описания объекта исследования.

5. Системный подход к описанию объектов порождает разумное разбиение объекта на части. Рекуррентное использование системного подхода порождает описание объекта с помощью иерархической структуры. Следовательно, иерархическая струк-

тура есть непрменный результат системного подхода. Отсюда ясно столь частое употребление термина «системно-структурный подход». Этот термин отражает интуитивное понимание системного подхода как способа структурирования объекта: системный подход гарантирует структурный результат.

6. Поскольку системность относится к способу описания объекта, а не к самому объекту, объекты не могут обладать системностью. Иначе говоря, не существует объектов, которые имели бы смысл называть системами. Этим, очевидно, и объясняется неудача многочисленных попыток дать определение системы.

7. Отняв у объекта исследования возможность быть системой, предполагаемая концепция награждает объект свойством организованности в смысле Гельфанда—Цетлина, свойством быть описанным малым числом параметров (т. е. допускающим разумное огрубление). Таковую замену нельзя считать чисто терминологической. Свойство быть системой является логической переменной. Она может принимать только два значения: «истина» или «ложь», т. е. объект может или быть системой, или не быть ею. Свойство обладать организованностью является численной переменной; объект может обладать различной степенью организованности, т. е. допускать огрубленное описание различной степени приближения к исходному.

Изложенная интерпретация системного подхода позволяет определить место системного подхода в геологии.

Прежде всего нужно отметить, что предложенная трактовка системного подхода близка к точке зрения на системные исследования среди геологов. Для примера укажем на работу Б. И. Смирнова [33]. Из нескольких десятков определений понятия «система» автор выбирает лишь пять и из этих пяти определений системы он делает вывод, что любое системное описание предполагает выполнение таких процедур, как членение объекта на отдельные компоненты и выявление структуры системы. Примечательно, что Б. И. Смирнов заменил понятие «система» понятием «системное описание», которое и есть членение объекта и выявление его структуры. С этим утверждением нужно полностью согласиться.

Этот пример еще раз подчеркивает, что предлагаемая концепция системного подхода — это систематизированное, конкретизированное и уточненное изложение весьма распространенных взглядов на сущность системного подхода, попытка перевести неформальные суждения в утверждения, допускающие построение алгоритмов.

Обсуждая проблему выделения геологических тел, необходимо коснуться полемики между теми, кто утверждает существование «естественных геологических тел», и теми, кто отстаивает «модельно-целевой подход» в выделении геологических тел. Обе точки зрения исходят из первичности понятия границы, т. е. основаны на локальном подходе. Сторонники существова-

ния естественных геологических тел в качестве границ принимают поверхности резкого изменения какого-либо свойства. Сторонники «модельно-целевого» подхода считают, что граница тела может быть установлена по какому-либо условию (например, по условию превышения порога концентрации руды или предела прочности породы). При изменении целей исследования или технологии добычи порог может быть изменен и тем самым сдвинутся все границы. Такого рода границы не могут быть выделены «естественным» путем, при непосредственном восприятии.

Очевидно, необходимость выделения такого рода границ привела к необходимости такой формулировки: геологическая граница — это любая поверхность (линия, точка), проведенная в геологическом пространстве в результате некоторой однозначной процедуры [23]. Такой подход сугубо технологический и поэтому получил наибольшее распространение в инженерной геологии.

Существует другая форма целевого выделения объектов — выделение однородных объектов. Примером может служить расчленение разреза на пласты по каротажным данным с целью их количественной интерпретации. Для этой цели каждый пласт должен быть однородным, т. е. значение геофизических параметров в нем должно слабо изменяться, ибо палетки для количественной интерпретации получены на модели однородного пласта. В такой задаче допустимая неоднородность будет различной для разных геофизических методов и соответственно приведет к различному разбиению разреза на пласты. Однако в отличие от огрубленного описания разреза такое расчленение сугубо локальное.

Расчленение разреза на пласты может преследовать и третью цель: попластовую корреляцию разреза. С точки зрения этой задачи пластом считается то, что прослеживается от скважины к скважине. Естественно, решение о том, является ли данный интервал разреза в скважине пластом или нет, решается в зависимости от характеристик разреза в других скважинах, т. е. решение этой задачи требует системного подхода.

При построении сводного разреза, представляющего некоторую часть региона или площади, необходимо удовлетворять обоим требованиям: описание должно быть разумно огрубленным (в соответствии с требованиями, изложенными выше) и содержать в то же время только «истинные» пласты, т. е. пласты, распространенные и выделенные на всей представляемой территории. Только в этом случае такой разрез будет иметь предсказательную силу в отношении разрезов вновь пробуренных скважин.

Между естественным и системным подходами выделения геологических тел отношения достаточно ясны. Естественные границы представляют собой исходное разбиение геологической

толщи. Оно задается, например, функцией $\text{sign} [f(x) - \bar{f}(x)]$. Важным свойством «естественного» разбиения является то, что оно содержит в себе искомые разумные, устойчивые описания разреза, которые позволяют его описать как совокупность объектов более высокого уровня иерархии. Таким образом, естественные геологические тела нельзя считать миражом, выдумкой наивных геологов. С другой стороны, нужно отдавать себе отчет в том, что естественное описание есть лишь исходный материал для создания укрупненных описаний, которые необходимы при создании сложных теоретических конструкций.

Системный и целевой подходы к выделению геологических тел отличаются своими задачами. Цель системного подхода — получение разумно огрубленного описания. Описание объекта не является собственно геологической задачей и не решает никаких конкретных задач, однако практика показывает, что свернутое описание исключительно полезно при решении многих практических и теоретических задач, хотя нельзя гарантировать решение ни одной из них. Иначе говоря, область применения разумных огрубленных описаний широка, но неопределенна. Для целевого подхода характерна противоположная ситуация. Задавшись задачей, можно получить описание, которое заведомо приемлемо в данной задаче (или группе задач), но не имеет смысла во всех других задачах, т. е. область применения целевого описания невелика, но определена.

Системный подход используется каждым геологом и геофизиком в повседневной работе, в каждом акте выделения геологического тела на каротажной кривой, в геологической колонке, на карте, на космическом снимке. Однако это не единственная область приложения системного подхода в геологии. Во всех случаях, когда интерпретация части зависит от всего остального, реализуется системный подход. Например, корреляция разрезов двух скважин требует системного подхода: отождествление участков кривых двух диаграмм зависит от результатов отождествления других участков. Они связаны требованием одинаковой упорядоченности пластов в обеих скважинах. В данном случае критерий упорядоченности выступает синонимом разумности проведенного сопоставления. Решение о присутствии фациального замещения есть также результат реализации системного подхода. Такая интерпретация некоторого интервала разреза может быть принята (т. е. будет разумной) только в том случае, если вышележащие и нижележащие пласты принадлежат к одному стратиграфическому горизонту с единым геометрическим законом осадконакопления. Этот же интервал разреза, включенный в другую последовательность пластов, будет интерпретироваться иным образом. Это же относится к определению места несогласия в разрезе. Данная граница интерпретируется как граница несогласия (или согласия) в зависимости от строения прилегающей толщи осадков. Еще один пример использования системного подхода — задача определения

водонефтяных контактов в многопластовой залежи (см. § 1 гл. VIII).

Не будет преувеличением сказать, что использование системного подхода к анализу геологических данных, требующего принятия решения с учетом окружающей обстановки и контекста, является скорее правилом геологической работы, чем исключением. Вместе с тем необходимо отделить системный подход исследования от других подходов. Очень часто исследование сложных объектов (объектов с большим числом элементов и связей) отождествляют с системным подходом. Изложенная выше концепция показывает, что это не так. Если задана сложная «система» (в общепринятом смысле этого слова), то определены ее части и взаимодействия и требуется выяснить закономерности ее функционирования, то эта задача не имеет ничего общего с системным подходом. Ю. А. Шрейдер и А. А. Шаров считают, что при системном подходе первоначально открытое наблюдателю поле исследования принципиально аморфно, не расчленено [39].

Точно так же необходимо разграничить системный подход от комплексного. Комплексный подход означает использование комплекса характеристик, описывающих объект, для интерпретации (т. е. для определения еще одной характеристики) этого же объекта. Системный подход означает использование характеристик других объектов для интерпретации данного объекта. Например, задача интерпретации комплекса каротажных данных для выделения нефтеносных пластов с помощью программ распознавания (см. § 1, гл. II) есть задача комплексной интерпретации, не имеющая отношения к системному подходу. В этой задаче интерпретация каждого пласта производится независимо, т. е. не зависит от интерпретации всех остальных (или части) пластов. А вот задача выделения нефтеносных пластов по комплексу каротажных данных без материала обучения, на основе использования критерия упорядоченности, есть реализация системного подхода, ибо интерпретация каждого пласта зависит от интерпретации всех остальных пластов.

Глава VIII

РЕШЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу установления границ между отдельными горизонтами нефтяного месторождения и определения положения водонефтяного контакта (ВНК) в каждом горизонте. Горизонтом называется максимальная пачка пластов, связанная в единый гидродинамический резервуар. Горизонты отделены друг от друга практически непроницаемыми для флюидов пластами и гидродинамически не связаны. Естественно, что выделение горизонтов важно для эксплуатации месторождения:

каждый горизонт требует определения своего режима отбора нефти, организации своего законтурного (или внутриконтурного) заводнения и других мер, направленных на повышение нефтеотдачи пласта, т. е. отдельного решения всех вопросов, связанных непосредственно с движением жидкости по эксплуатируемым пластам. Однако выделение горизонтов возможно не только с помощью гидродинамических исследований в процессе эксплуатации месторождения. Вследствие того что непроницаемые перегородки между пластами существуют длительное время, внутри каждого горизонта устанавливается свой водонефтяной контакт. Таким образом, задача разбиения разреза месторождения на горизонты заключается в том, чтобы разбить разрез на пачки пластов, которые разделены непроницаемыми пластами (покрышками) и имеют единый водонефтяной контакт.

Для решения этой задачи необходимо выделить возможные покрышки (на основании корреляции разрезов скважин и выделения в разрезе достаточно мощных и распространенных повсеместно непроницаемых пластов) и определить нефтеносность во всех пластах разреза (по данным каротажа). Далее производится следующий анализ: 1) если во всех пластах между соседними покрышками отмечается единый уровень ВНК, то такая пачка пластов объявляется горизонтом; 2) если в этих пластах нет единого ВНК, то пачку нужно разбить на две путем выделения новой покрышки так, чтобы в каждой из вновь полученных пачек существовал единый уровень ВНК; 3) если в соседних пачках отмечается один и тот же уровень ВНК, то эти пачки объединяются в одну.

Такова идеальная схема выделения горизонтов на месторождении. Условие ее успешной реализации — абсолютно надежные результаты предварительной обработки данных (корреляции разрезов и выделения нефтеносных пластов). Решение задачи сильно осложняется, когда падает надежность корреляции и (или) интерпретации.

При ненадежной корреляции растет число возможных вариантов разбиения разреза на горизонты: при надежной корреляции происходит лишь перебор кандидатов в покрышки, а при ненадежной возникают еще различные варианты проведения пластов-покрышек. Нужно отметить, что в этой задаче корреляция разрезов может проводиться не полностью. Необходима лишь корреляция пластов-покрышек (например, в песчано-глинистом разрезе только глинистых пластов). Коррелировать пласты-коллекторы не обязательно, так как ВНК отбивается по абсолютным отметкам.

При ненадежном определении насыщения пластов падает надежность отбивки ВНК, т. е. надежность критерия выделения пачки пластов в отдельный горизонт. В такой ситуации тяжесть решения проблемы разделения пластов на нефтеносные и водоносные переносится на результаты опробования скважин.

Процесс разбиения разреза на горизонты становится циклическим: принимается некоторый вариант корреляции покрышек, затем производится разбиение на горизонты и в соответствии с полученной схемой опробуется скважина. До тех пор пока результаты опробования позволяют проводить внутри каждого горизонта единый ВНК, схема разбиения на горизонты признается правильной. В случае же, когда новые результаты опробования не позволяют больше устанавливать единый ВНК, приходится пересматривать или выбор покрышки, или результаты корреляции, приведя их в соответствие с результатами опробования. На первых стадиях этого циклического процесса ведущая роль отдается результатам опробования. Однако в дальнейшем при получении достаточно надежной схемы выделения горизонтов и положений ВНК в них противоречия между результатами опробования и положением ВНК могут приводить к тому, что под сомнение будут ставиться результаты опробования (например, в результате некачественного цементирования скважины). В результате возникает проблема оптимизации процедуры выделения горизонтов, т. е. достижения правильного решения при наименьшем числе опробований (для сокращения числа опробований пластов, давших приток воды).

Из рассмотрения процесса разбиения разреза месторождения на горизонты видно, что задача требует системного подхода. Это следует из того, что покрышки выделяются нелокально и результат может зависеть от того, каковы результаты опробования других пластов, а заключение о насыщении пластов может приниматься с учетом результатов испытания других пластов и положения покрышек. Разбиение разреза на горизонты должно производиться так, чтобы каждый горизонт был разумно выделен (т. е. чтобы его ограничивали покрышки и в нем существовал единый ВНК) и все вместе они разумно стыковались, т. е. горизонты заполняли бы разрез без пропусков и не пересекались друг с другом (иначе говоря, чтобы покрышка одного горизонта являлась подошвой покрывающего).

Задача теряет свой системный характер, когда корреляция и интерпретация абсолютно надежны. В этом смысле она аналогична одной из задач восприятия зрительных изображений. Задача чтения рукописного текста требует сугубо системного подхода: слово должно быть разделено на части таким образом, чтобы все части одновременно имели разумную интерпретацию (т. е. были буквами данного языка) и целое (т. е. слово), составленное из этих частей (букв), было осмысленным. Если же стоит задача чтения печатного текста, то разделение слова на буквы не представляет никаких трудностей и не требует системного подхода.

В обоих примерах (геологическом и лингвистическом) видно, что объекты нашего исследования могут обладать различной степенью организованности. В случае максимальной организованности разбиение может быть произведено по

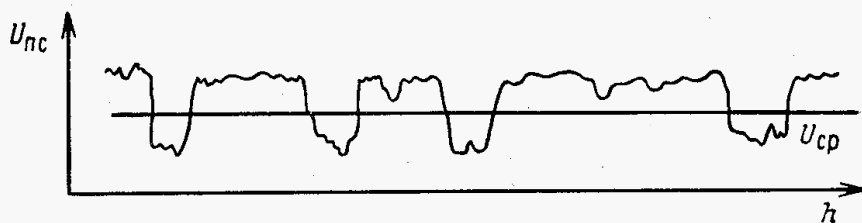


Рис. 44. Кривая $U_{пс}(h)$

локальным характеристикам. По мере уменьшения организованности для надежной интерпретации в данном месте требуется использование информации о других частях объекта, т. е. требуется системный подход. Этот принцип хорошо иллюстрируется на примере расчленения разреза с помощью алгоритма КЧП. Если глинистый разрез содержит песчаные пласты одной мощности, т. е. кривая в высшей степени организована (рис. 44), то исходное разбиение на объекты (с помощью средней линии) дает решение задачи без использования нелокального алгоритма КЧП. Если же имеются пласты различной мощности и обладающие разными характеристиками, то разумное описание кривой возможно только при использовании системного подхода.

Какие возможности для решения задачи расчленения разреза на горизонты представляют описанные в предыдущих главах методы определения нефтеносности пластов и корреляции разрезов?

Во-первых, представляется разумным определять нефтеносность пластов с помощью программ распознавания, использующих принцип упорядоченности в трех модификациях: по скважине, площади и абсолютной отметке. Преимущество этих программ перед обычными методами интерпретации может сказаться на первых порах разведки, когда еще недостает результатов опробования для построения петрофизических зависимостей. В то же время, количество пластов, исследованных каротажем, велико и они могут использоваться для обучения в соответствующих программах. Во-вторых, законы перспективной корреляции могут помочь в проведении правильной корреляции.

Для примера опишем расчленение разреза на горизонты на месторождении Жетыбай (рис. 45). Видно, как некоторые результаты опробования привели к резкому изменению границ горизонтов. Например, два нефтеносных пласта в скв. 15 первоначально числились принадлежащими горизонту IX. Однако после того как из них была получена нефть, граница между горизонтами IX и X была перенесена вверх на 15 м и эти пласты оказались в кровле горизонта X. То же относится к двум нефтеносным пластам в горизонте VIII (скв. 8), к нефтеносному пласту в скв. 38, после испытания которого граница горизонта X была поднята на 30 м. К 1967 г. опробование проведено

по двум—пяти пластам в каждом горизонте. ВНК в каждом горизонте и характер насыщения каждого пласта определялись с помощью программ распознавания, использующих принцип упорядоченности (см. § 1, гл. V). На рис. 45 показаны результаты интерпретации пластов во всех скважинах с помощью этой программы. Порядок расположения скважин на схеме определялся абсолютной отметкой кровли горизонта *VIII^a*: рядом располагались скважины, имеющие близкие абсолютные отметки по этому горизонту; при движении по схеме слева направо мы переходим от скважин, расположенных в куполе, к скважинам, расположенным в крыльях структуры. Освобождение от части информации (положение скважины на структуре) делает более наглядной имеющуюся информацию о положении ВНК и границах горизонтов.

С помощью указанного выше алгоритма машина во всех горизонтах (за исключением горизонта *VIII^a*) уверенно определила отметки ВНК, которые не противоречат результатам опробований. В этих горизонтах машина сделала мало ошибок (если исходить из принятого ВНК и принятых границ горизонтов), поэтому результаты интерпретации в каждом пласте можно считать достаточно надежными. Это особенно справедливо по отношению к пластам большой мощности, определение нефтеносности которых вообще редко оказывается ошибочным.

В связи с этим обращают на себя внимание результаты машинной интерпретации в пластах большой мощности: 323-й пласт (скв. 65), 121-й (скв. 13), 247-й (скв. 38). Все эти пласты находятся в кровле горизонта *IX* и выше ВНК, но программой уверенно отнесены к водоносным пластам. Пласт 276 (скв. 50) лежит в подошве горизонта *XI* и ниже ВНК, а машиной уверенно отнесен к нефтеносным пластам.

При рассмотрении рис. 45 обращаешь внимание и на то, что в пределах площади резко изменяются мощности выделенных горизонтов (например, в горизонте *IX* от 20 до 50 м), что ставит под сомнение достоверность установленных границ (особенно с учетом модели Хейтса). Границы горизонтов были изменены так, чтобы выделенные горизонты удовлетворяли двум требованиям: 1) мощности горизонтов должны быть постоянными, 2) число противоречий результатов машинной интерпретации (или данных опробований) с положением ВНК, принятым в данном горизонте, должно быть достаточно малым. Это оказалось возможным при следующих предположениях.

Мощности пластов-покрышек (глин) в данном интервале разреза месторождения Жетыбай очень изменчивы по площади. Это противоречит модели Хейтса. Если все же придерживаться этой модели, то данную картину распределения мощностей необходимо рассматривать как аномальную и искать ей специальные объяснения. Например, первоначально пласты откладывались в соответствии с законом Хейтса (рис. 46), т.е. верхняя граница (*A—A*, *B—B*) их была горизонтальной.

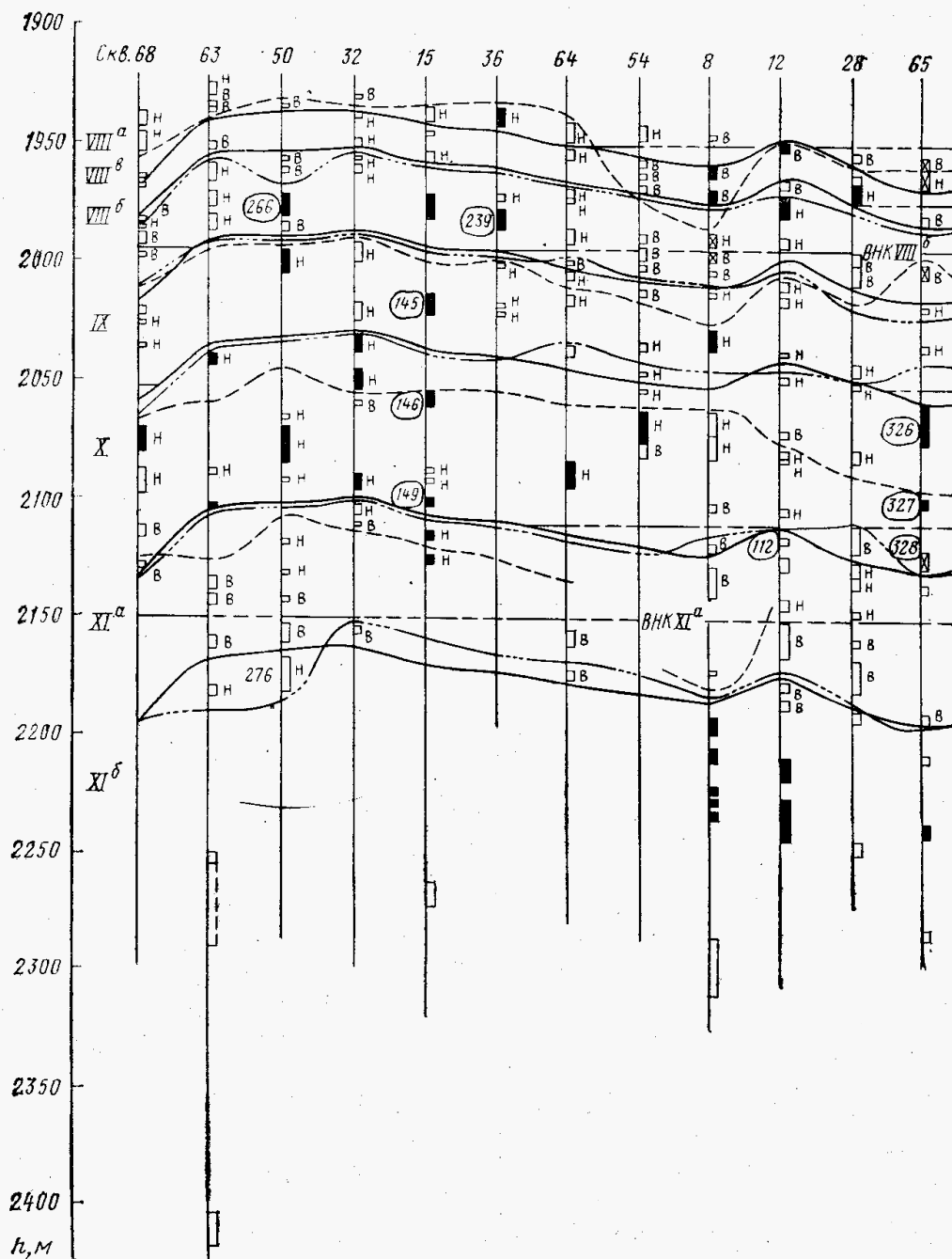
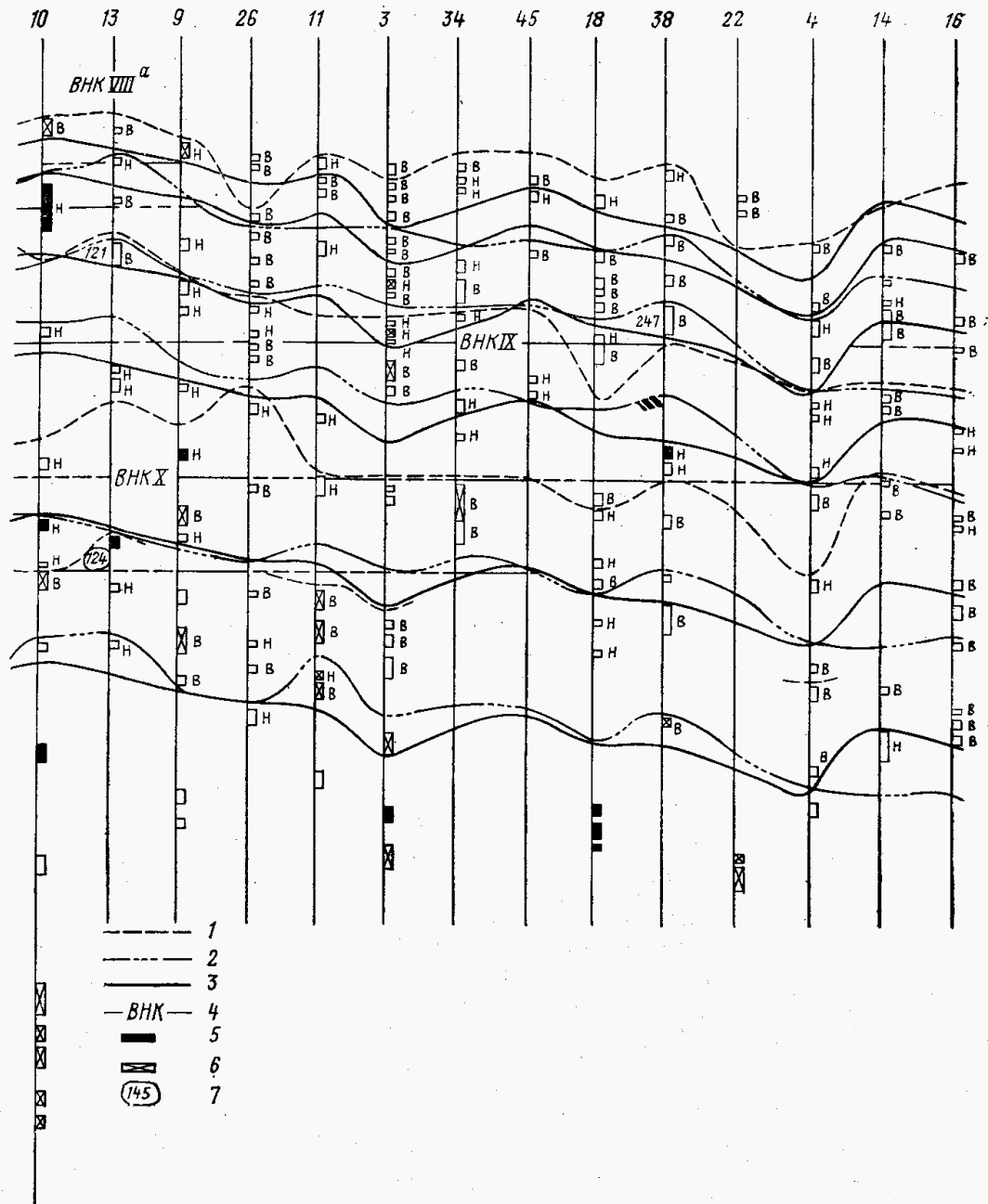


Рис. 45. Схема расчленения месторождения Жетыбай.

Границы горизонтов: 1 — к 1966 г., 2 — к 1967 г., 3 — полученные в результате системного анализа в 1967 г.; 4 — уровень ВНК; 5 — пласты, давшие приток нефти; 6 — пласты, давшие приток воды; 7 — пласты, использованные для проверки схемы; В и Н — результаты машинной интерпретации (водоносные и нефтеносные)

Однако вторичные процессы (например, сильные течения) могли избороздить эту поверхность и сделать ее очень неровной. Если для простоты предположить, что границы пластов откладывались параллельно, то можно себе представить схему возник-



новения во времени ($T_1 - T_4$) глинистого пласта так, как показано на рис. 46.

Из рассмотрения схемы видно, что отложившийся глинистый пласт может служить крышкой лишь в том случае, когда углубления в нем по мощности не достигают половины мощности пласта (см. рис. 46). В противном случае велика вероятность встречи двух углублений (хоть в одном месте) и нарушения герметичности этого пласта как крышки. Это же требование ограничения мощности углублений в пласте-крышке можно выразить иным способом. Можно потребовать, чтобы

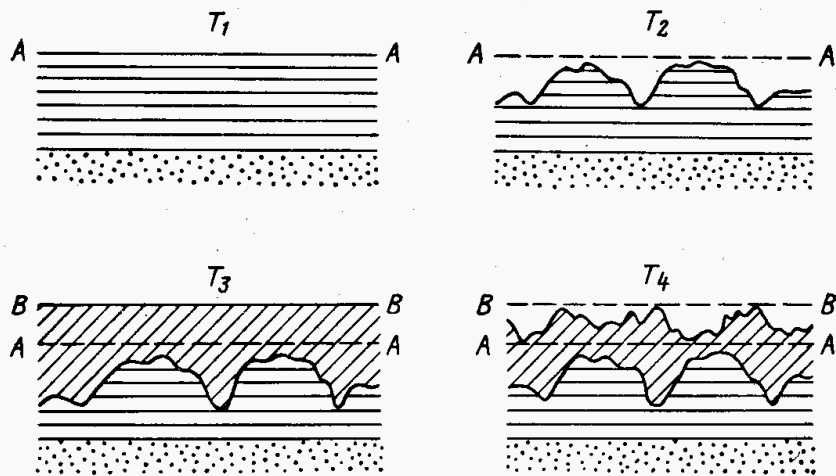


Рис. 46. Схема образования покрывки

существовала горизонтальная плоскость, целиком лежащая внутри пласта-покрывки.

Можно также предположить (в первом приближении), что все пласты рассматриваемого интервала разреза залегают примерно параллельно, т. е. принадлежат одному этапу (такое предположение вполне правдоподобно, ибо мощность интервала всего 250 м). В таком случае можно утверждать, что в каждую из покрывок этих горизонтов может быть вписана одна и та же поверхность (со сдвигом по глубине). Если принять эти поверхности за границы горизонтов, то мощности горизонтов в пределах площади будут постоянными.

Такую систему параллельных границ горизонтов удалось построить (см. рис. 45), и число противоречий результатов интерпретации пластов (или данных опробований) с положением ВНК оказалось достаточно малым.

Границы горизонтов, выделенные исходя из указанных критериев, были подвергнуты некоторым логическим проверкам.

1. Иным образом выделить горизонты, удовлетворяющие двум указанным выше требованиям, не удается.

2. Подтверждением правильности полученных границ горизонтов может служить структурная карта, построенная на основе новых границ (рис. 47).

Так как границы горизонтов устанавливались в каждой скважине независимо от ее положения на структуре и положения границ горизонтов в соседних скважинах, вовсе не было гарантии, что удастся построить приемлемую с геологической точки зрения карту (могло, например, оказаться, что абсолютные отметки изменяются от скважины к скважине). Естественно, что построенная структурная карта оказывается одной и той же для границ всех горизонтов (с точностью до постоянной). Эта карта отличается от каждой из карт, построенных

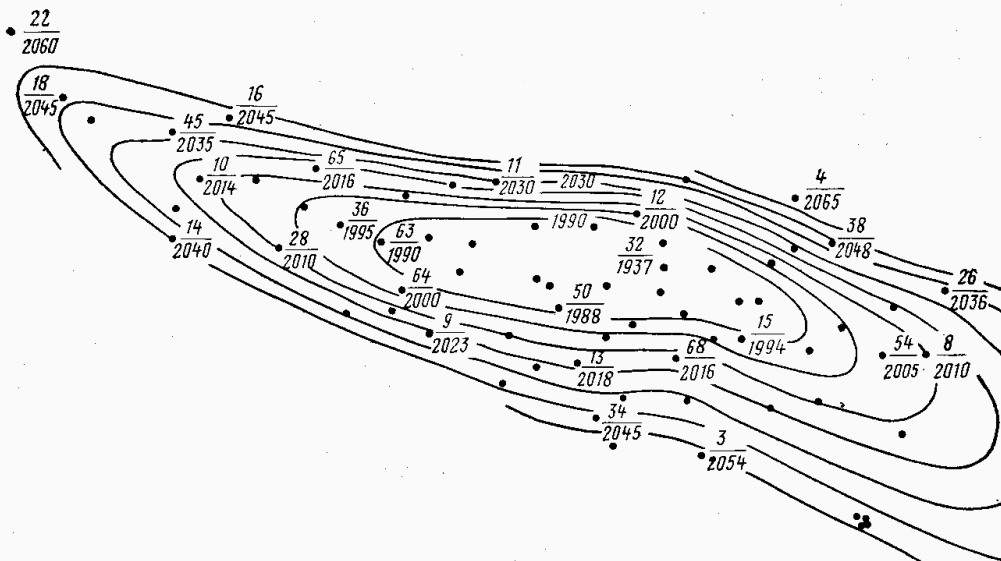


Рис. 47. Структурная карта «условной поверхности» покрышки горизонта IX месторождения Жетыбай

геологами по кровле горизонтов. И дело здесь не в том, что одна построена математиками, а другая — геологами. Дело в том, что это разные карты. Геологическая карта отражает истинное положение покрышки в каждой скважине. Однако такое знание не слишком информативно. Из-за сильной изменчивости мощности покрышки по площади положение ее подошвы в одной скважине не дает возможности судить с достаточной точностью о положении подошвы в соседней скважине. По той же причине карта по кровле одного горизонта ничего не говорит о подробностях строения нижележащих покрышек, лишь в среднем они повторяют друг друга. В картах, построенных на основе закона Хейтса, отражены общие характеристики геометрии покрышек. Они содержат в себе информацию о том, как деформировались слои в своей истории.

3. В нашем распоряжении имелось некоторое число опробованных пластов, принадлежность которых к тому или иному горизонту не была установлена: они не были использованы при составлении схемы, а использовались для фактической проверки предложенной схемы. Как видно на рис. 45, все эти пласты так располагаются относительно границ горизонтов и ВНК, что не возникает ни одного противоречия.

Таким образом, предложенные границы горизонтов выдерживают ряд проверок. Приведенные результаты по установлению границ горизонтов и определению ВНК получены, исходя из общих принципов, без использования конкретных геологических особенностей района. Поэтому предложенный метод может быть использован и на других месторождениях с многопластовыми залежами. Однако при этом нельзя забывать о возможных трудностях. Первая заключается в том, что не удастся

найти ни одного решения проблемы указанным способом, т. е. не удастся построить систему параллельных границ горизонтов с единым ВНК между ними. Это может, например, означать, что законы Хейтса в данном случае не выполняются.

Вторая трудность состоит в том, что число решений слишком велико и нет возможности выбрать одно из них. Это может означать, что имеющейся информации недостаточно для решения задачи разделения разреза на горизонты.

Часть четвертая

МОДЕЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ АНАЛИЗОМ ДАННЫХ

Глава IX

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Мы рассмотрели различные этапы решения некоторых типичных геологических и геофизических задач: предварительная постановка задачи, выбор объекта и способа его описания, сбор данных, подготовка данных, определение необходимой априорной информации, выбор способа анализа данных, получение решающего правила, проверка эффективности решающего правила и его обоснованности. Последний шаг в этой цепочке — анализ решающего правила — кроме прагматической цели (определения надежности решающего правила с целью его использования в будущем), всегда содержит в себе элемент теоретизирования. Хорошее решающее правило всегда рассматривается как подтверждение правильности той теории (или модели), которая была положена в основу работы, определила и постановку задачи, и выбор объекта исследования, и способ описания объекта, и метод решения. Невозможность получения хорошего решающего правила всегда ставит вопрос о возможном пересмотре исходной модели. Получение хорошего решающего правила в ситуации, когда отсутствует какая-нибудь конкретная модель, служит основанием для построения (а точнее сказать, синтезирования) модели исследуемого объекта или теории исследуемого явления.

Конечно, этим не заканчивается анализ геологических и геофизических данных. Заканчивается лишь этап исследований. Новая теория или модель позволяют пересматривать постановку старых задач и ставить новые задачи, стимулируют новые схемы сбора и анализа данных. Тем самым начинается новый этап. Рассмотрим несколько примеров проверки модели или построения новой модели.

§ 1. ИНФОРМАТИВНОСТЬ МЕТОДОВ КАРТАЖА И МОДЕЛЬ ПЛАСТА

При решении задач классификации геологических объектов по широкому комплексу геологических, геофизических и геохимических данных непременно встают вопросы о ценности того или иного из применяемых методов, о том, какие методы целесообразно сочетать друг с другом, т. е. возникает проблема

выбора рационального комплекса исследований. Использование программ распознавания для комплексной интерпретации геологических, геофизических и геохимических данных дает возможность не только с высокой эффективностью решать задачи классификации геологических объектов, но и позволяет количественно оценивать информативность каждого из методов, входящих в комплекс при решении конкретных задач.

Пусть для решения задачи используется комплекс данных, который позволяет решать задачу некоторым алгоритмом с эффективностью p , т. е. доля правильных заключений составляет p . Добавим в этот комплекс параметр a_i и опять решим поставленную задачу (с помощью того же алгоритма). Если окажется, что эффективность решения задачи не изменилась, то это означает, что параметр a_i не содержал никакой новой информации по сравнению с той, которая содержалась в имевшемся комплексе. Если же эффективность решения задачи увеличится ($p_i > p$), то параметр a_i содержит новую информацию. Величина изменения эффективности решения задачи $q_i = p_i - p$ будет мерой информативности параметра.

Очевидно, информативность метода есть условная характеристика, так как она будет изменяться при решении разных задач, при использовании различных комплексов параметров, различных алгоритмов обработки информации.

Используя программы распознавания, можно подойти и к вопросу выбора рационального комплекса исследований. Такой выбор может произвести сама программа, если в нее заложить стоимость получения данных каждым из методов и критерии, которым должен удовлетворять комплекс (например, добиться минимума стоимости работ при заданной эффективности решения задачи).

Выше была определена информативность параметров, которая указывала, сколько дополнительной информации вносит данный параметр в комплекс. Представляет интерес определение и другой характеристики параметров, отражающей вес каждого параметра внутри данного комплекса.

При использовании программы, в которой решающее правило задается коэффициентами уравнения плоскости, мерой веса (или значимости) параметра может служить сумма абсолютных значений коэффициентов, относящихся к данному параметру. Например, если параметру отведены разряды с 12-го по 16-й, то эта сумма равна $|\alpha_{12}| + |\alpha_{13}| + |\alpha_{14}| + |\alpha_{15}| + |\alpha_{16}|$. Чем больше эти коэффициенты, тем сильнее влияет данный параметр на конечный результат.

При использовании программы «Кора-3» — значимость параметра можно определить по тому, как часто этот параметр использовался при формировании признаков принадлежности к I и II классам. Как связаны между собой информативность параметра и его вес в данной задаче при использовании программы «Кора-3»?

Если информативность параметра равна нулю, то возможны две причины. Во-первых, в параметре может вообще не содержаться никакой информации о данной задаче. Во-вторых, параметр может содержать полезную информацию, но эта информация дублирует ту, которая уже имеется в комплексе. В первом случае вес параметра в комплексе будет равен или близок к нулю (с возможными отклонениями за счет ограниченности статистики). Во втором случае программе удобнее извлечь необходимую информацию именно из этого параметра, хотя ту же информацию она могла бы извлечь и из других параметров. Например, в программе «обобщенный портрет» это может зависеть от порядка показа объектов во время обучения. В программе «Кора-3» это может зависеть от порядка расположения параметров во входном векторе и от перебора.

С другой стороны, если вес параметра оказывается равным нулю, то его информативность обязательно равна нулю, так как исключение этого параметра никак не изменяет решающего правила и эффективности распознавания. Если же вес параметра велик, то это не гарантирует того, что его информативность также будет велика.

Введенная оценка веса (или значимости) параметров может быть использована для выяснения связей между геофизическими параметрами. Для этого необходимо выяснить, как реагирует программа на исключение какого-либо параметра, за счет каких параметров пытается программа скомпенсировать потерю информации. С этой целью из первоначального комплекса исключают один из параметров и наблюдают за изменением частоты обращения программы к оставшимся параметрам. Если частота обращения к каким-то параметрам увеличилась, то это означает, что именно за счет этих параметров программа пытается восполнить утерянную информацию. На рис. 48 приведены частоты обращений программы к различным параметрам при полном комплексе и при исключении из комплекса отдельных параметров (обучение машины проводилось на 45 нефтеносных и 45 водоносных пластах Ромашкинского месторождения мощностью до 4 м).

Во многих случаях при исключении из комплекса данных какого-либо метода поведение программы вполне объяснимо с точки зрения существующих представлений о связи геофизических параметров. Так, когда из комплекса исключили показания 4-метрового градиент-зонда, программа значительно увеличила частоту обращений к показаниям ближайшего по размеру зонда — 2-метрового. При исключении показаний малого градиент-зонда ($AO=0,45$ м) возрастает частота обращения к потенциал-зонду ($AM=0,75$ м) и методу ПС, т. е. к зонду, который по глубине исследования наиболее близок к зонду $AO=0,45$ м и параметру ПС, отражающему коллекторские свойства. (Ведь показания зонда 0,45 м характеризуют

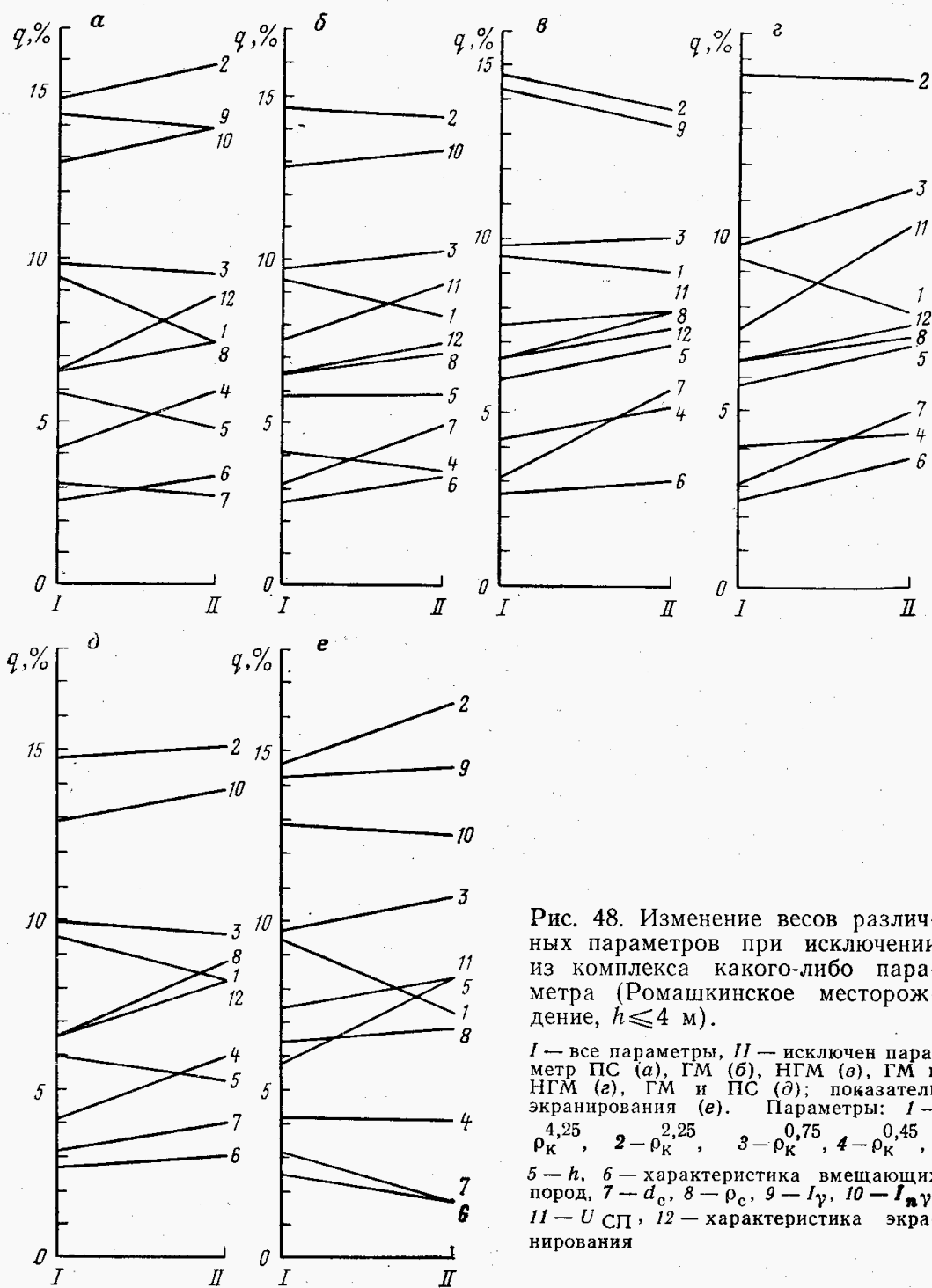


Рис. 48. Изменение весов различных параметров при исключении из комплекса какого-либо параметра (Ромашкинское месторождение, $h \leq 4$ м).

I — все параметры, *II* — исключен параметр ПС (*a*), ГМ (*б*), НГМ (*в*), ГМ и НГМ (*г*), ГМ и ПС (*д*); показатель экранирования (*e*). Параметры: 1 — ρ_K 4,25, 2 — ρ_K 2,25, 3 — ρ_K 0,75, 4 — ρ_K 0,45, 5 — h , 6 — характеристика вмещающих пород, 7 — d_c , 8 — ρ_c , 9 — I_γ , 10 — $I_{n\gamma}$, 11 — U СП, 12 — характеристика экранирования

промытую зону, т. е. в значительной мере пористость пласта.) Когда были исключены показания методов ГМ и НГМ, увеличилось число обращений программы к методу ПС и мощности пласта, т. е. к тем параметрам, которые также отражают коллекторские свойства.

Однако имеются случаи, когда поведение программы так просто объяснить нельзя. Например, когда из комплекса были исключены показания метода ГМ, то для восполнения потерянной информации о глинистости программа увеличила частоту обращения к методу, который тоже отражает глинистость пласта — к методу ПС. Можно было ожидать, что при исключении показаний метода ПС программа увеличит число обращений к методу ГМ. На самом же деле при исключении данных метода ПС увеличивается значимость НГМ и показаний малого градиент-зонда ($AO=0,45$ м). Такое, не совсем логичное на первый взгляд поведение программы можно объяснить тем, что методы ПС и ГМ по-разному отражают глинистость пласта. Как уже указывалось, показания метода ГМ определяются содержанием глинистого материала $C_{гг}$, т. е. этот метод отражает абсолютную глинистость. Показания же метода ПС отражают относительную глинистость: $\Delta U_{сп}/\Delta U_{сп}^{max} = \varphi [C_{гг}/(C_{гг} + k_{п})]$. Поэтому при исключении данных метода ГМ, когда программа теряет информацию об абсолютной глинистости $C_{гг}$, ей нужно увеличить число обращений к параметру, отражающему глинистость пласта, т. е. к ПС, а зная относительную глинистость (ПС) и пористость, она может восстановить информацию об абсолютной глинистости. Если же вместо метода ГМ исключить показания метода ПС, то при известной абсолютной глинистости (ГМ) для восстановления относительной глинистости программе необходимо знать пористость, поэтому она и увеличивает частоту обращения к методам, отражающим пористость: НГМ и зонд $AO=0,45$ м.

Подобного рода картина наблюдается и при исследовании карбонатного разреза. На рис. 49 приведены данные о частоте обращения к различным параметрам при выделении нефтеносных пластов в турнейских известняках месторождения Красноярское Оренбургской области. При исключении из комплекса параметра НГК программа, теряя информацию о пористости, может частично восполнить ее за счет параметра ПС и в результате частота обращения к ПС увеличится. В случае же, когда из вектора исключают параметр ПС, программа, потеряв в основном информацию о глинистости, не может восполнить потерю за счет НГК. В этом случае программа увеличивает число обращений к мощности пласта. Очевидно, что в данном карбонатном разрезе, как это наблюдается и в песчано-глинистом разрезе, мощность пластов связана с их глинистостью (хотя и наблюдаются аналогичные явления, но причины их могут оказаться весьма различными для карбонатных и песчано-глинистых отложений).

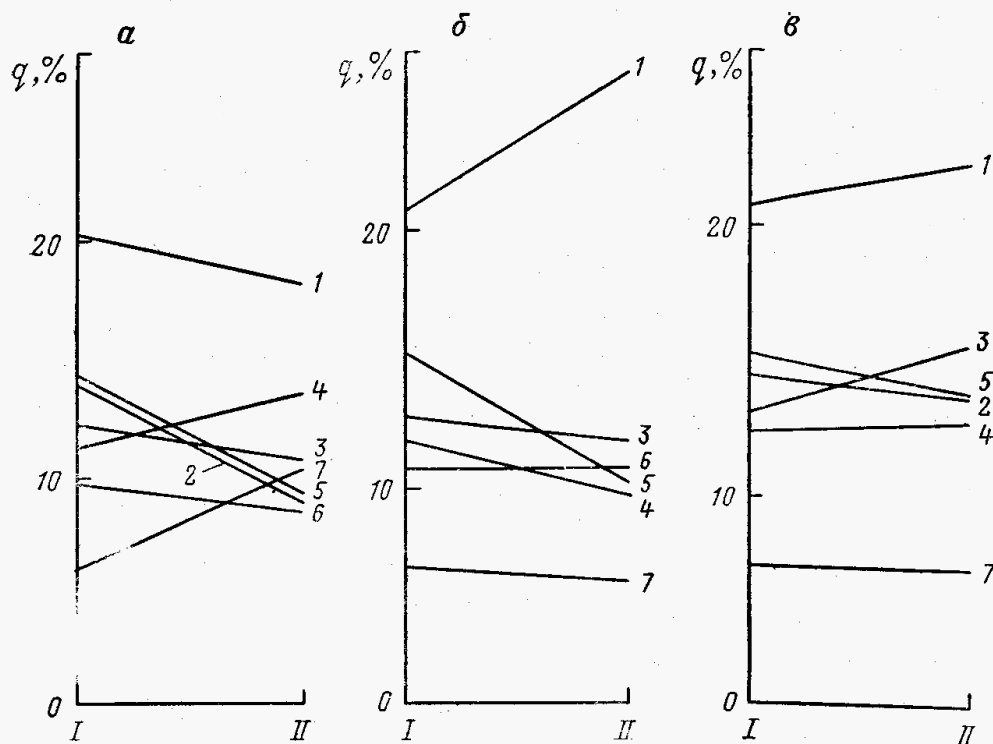


Рис. 49. Изменение весов различных параметров при исключении из комплекса отдельных параметров (Красноярское месторождение).

I — в обучение включены все параметры; II — исключен параметр НГК (а), время между вскрытием пласта и измерениями τ (б), $\rho_K^{4,25}$ (в). Параметры: 1 — $\rho_K^{4,25}$, 2 — $\rho_K^{4,25}$ с обращенным зондом, 3 — ρ_c , 4 — $U_{СП}$, 5 — НГК, 6 — τ , 7 — h

Наблюдается такой же эффект и в карбонатных отложениях другого типа (трещиноватые коллекторы малой мощности башкирского возраста на Осинском месторождении Пермской области): при исключении данных НГК программа увеличивает частоту обращения к ПС, а при исключении ПС чаще обращается к мощности пласта и малому зонду $AM = 1,05$ м.

Приведем еще один подобный пример. На Ромашкинском месторождении из комплекса были исключены параметры ПС и ГМ, т. е. программа потеряла информацию о глинистости и пористости пласта. Естественно, что для восполнения потерянной информации о пористости программа увеличивает число обращений к показаниям НГМ и зонду $AO = 0,45$ м. Казалось бы, что информацию о глинистости она могла бы извлечь из мощности пласта, так как известно, что на Ромашкинском месторождении мощность пласта связана с глинистостью. Однако в этом случае программа увеличивает число обращений к характеристике экранирования. Когда во входной вектор вводилась характеристика экранирования, то предполагалось, что этим параметром вносится информация об искажении показаний 4-метрового зонда и только. Но программа смогла извлечь

из этого параметра информацию другого рода. Характер экранирования в данной задаче определялся только мощностью пласта, расстоянием до экранирующего пласта и мощностью экранирующего пласта (верхнего известняка), которая в пределах Ромашкинского месторождения довольно постоянна, поэтому в этих условиях экранирование определяется только мощностью исследуемого пласта и расстоянием до экранирующего. Можно утверждать, что при прочих равных условиях занижающее экранирование более вероятно в пластах малой мощности. Более того, в пластах мощностью свыше 4 м оно вообще отсутствует. Тем самым экранирование отражает мощность пласта. Подтверждением этого может служить тот факт, что при исключении из комплекса характеристики экранирования увеличивается частота обращения к мощности пласта.

Таким образом, введенная оценка значимости геофизических параметров по частоте обращения к ним программы при распознавании позволяет обнаружить довольно сложные связи между геофизическими параметрами. В некоторых случаях они подтверждают установленные к настоящему времени зависимости. В других случаях нельзя найти им объяснений; это должно послужить стимулом для проведения дальнейших исследований физических характеристик пласта и их взаимосвязи.

Проведенный анализ показывает также, что в процессе построения решающего правила для разделения нефтеносных и водоносных пластов программа распознавания постоянно опирается на учет пористости и глинистости пластов. При этом она правильно ориентируется в вопросе о том, как различные геофизические параметры отражают эти петрофизические свойства пород. Удивление вызывает лишь тот факт, что программа смогла уловить эти закономерности на столь ограниченном объеме материала (от 50 до 100 пластов на каждом из месторождений). Вместе с тем нельзя забывать, что в материал обучения были заложены некоторые самые общие закономерности (например, в способе кодирования «ступенькой» заложено предположение о монотонности связи между некоторыми геофизическими параметрами и нефтенасыщенностью пласта; выбор объектов для обучения основывался на утверждении, что нефтеносность пласта не связана непосредственно с его пористостью и глинистостью).

Полученный результат важен также с точки зрения обоснования надежности и разумности решающих правил, полученных с помощью программ распознавания. Всегда казалось, что иметь несколько десятков объектов в обучении недостаточно для того, чтобы скомпенсировать отказ от явного использования петрофизических моделей, отказ промежуточного этапа — восстановления истинных значений геофизических параметров в пластах. Опыт же показал, что получаемые решения базируются на тех же связях, что и традиционные методы интерпре-

тации. Различны лишь способы обнаружения и использования этих связей.

Рассмотренная ситуация может быть обращена, т. е. связи, выявленные при анализе решающего правила, могут оказаться ранее не известными и послужить основой для создания новой модели объекта, как это было в задаче прогноза сейсмичности дизъюнктивных узлов.

§ 2. МОДЕЛЬ СЕЙСМОГЕННОГО ДИЗЪЮНКТИВНОГО УЗЛА

После успешного решения задачи распознавания сейсмогенных узлов в различных районах мира (Средняя Азия, Закавказье, Малая Азия, Балканы, Эгейское море, Италия, Калифорния), выдержавшего многочисленные проверки, в работе [35] был поставлен вопрос о том, что отличает высокосейсмичные морфоструктурные узлы (В-узлы) от низкосейсмичных (Н-узлов). Чтобы ответить на поставленный вопрос, рассмотрим параметры, из которых состоят признаки В и Н, отобранные программой «Кора-3». Для этого возьмем не только характерные признаки, но эквивалентные и ε -эквивалентные, не использованные при голосовании.

Рассмотрим два признака некоторого класса F_1 и F_2 . Множество объектов этого же класса, которые имеют F_1 или F_2 , обозначим f_1 или f_2 соответственно. Признаки F_1 и F_2 эквивалентны, если f_1 и f_2 совпадают. Они ε -эквивалентны, если доля несовпадающих объектов в f_1 и f_2 не больше ε (эта доля есть отношение числа несовпадающих объектов к общему числу объектов в f_1 и f_2 , при этом каждый объект считается один раз).

Эквивалентные признаки должны рассматриваться из следующих соображений. Пусть F_1 — характерный признак, F_2 — его эквивалентный признак. Признак F_1 отобран из эквивалентных признаков практически случайно: только потому, что он первым встретился в процессе обучения; F_2 мог быть отобран вместо F_1 при другом порядке вопросов в описании объектов. Таким образом, характерный признак не имеет преимуществ перед другими эквивалентными признаками при геологической интерпретации.

По аналогичной причине следует рассматривать и ε -эквивалентные признаки. Действительно, предположим, что F_1 — характерный признак, F_2 — нет и оба они ε -эквивалентны. Различие между F_1 и F_2 мало. Если f_2 был бы немного больше, F_2 мог бы быть отобран в характерные признаки. Это различие может быть слишком мало, чтобы не обращать внимания на параметры в F_2 . Оно может даже возникнуть случайно из-за ошибок в определении параметров или из-за того, что f_1 случайно оказалось несколько больше f_2 . Мы не можем быть уверены, что F_2 не следовало бы отобрать как характерный признак вместо или кроме F_1 . Таким образом, мы должны

Использованные параметры

Параметр	Порог дискретизации	
	1968 г.	1918 г.
Максимальная высота * h_{\max} , м	500	500
Минимальная высота * $ h_{\min} $, м	1250	1250
Перепад высот * Δh , м	50	50
	500	500
	1000	1000
Расстояние между точками с максимальной и минимальной высотами * l_1 , м	—	—
Градиент * $\Delta h/l_1$	30	30
	70	70
Площадь рыхлых толщ * q , %	10	10
	50	50
Тип пород *	Наличие изверженных пород	Отсутствие
Расстояние до ближайшего разлома r_1 , км	12,5	12,5
	37,5	25
Расстояние до ближайшего пересечения разломов R_1 , км	—	—
Расстояние до ближайшего конца разлома R_2 , км	—	—
Расстояние до ближайшего конца или пересечения разломов r_2 , км	12,5	12,5
	37,5	37,5
Расстояние до геотермальной зоны r_3 , км	25	25
	75	75
Расстояние до зоны повышенных осадков R_4 , км	—	62,5
Расстояние до ближайшего водного резервуара r_6 , км	0	25
	25	—
Расстояние до ближайшего выхода францисканской свиты R_5 , км	—	—
Расстояние до ближайшего конца зоны расхождения ($40,5^\circ$, $-126,6^\circ$ и $33,2^\circ$ — $115,6^\circ$ W) r_4 , км	100	100
	200	200
Расстояние до выделенной точки (пересечения Сан-Андреас с разломом Биг-Пайн) r_5 , км	125	250
	375	375
Число некондиционных разломов по тектонической карте * N_1	—	—
Тип рельефа вкrest простирания разлома *	—	—
Число перемен типа рельефа вкrest простирания разлома * n_2	0	0
Тип рельефа вдоль простирания разлома *	—	—
Максимальная высота ** H_{\max} , м	500	500
	1500	1500
Минимальная высота ** H_{\min} , м	0	—
	200	0
Перепад высот ** ΔH , м	—	1500
Расстояние между точками с максимальной и минимальной высотами ** l_2 , м	—	—

Параметр	Порог дискретизации	
	1968 г.	1918 г.
Градиент ** $\Delta H/l_2$	—	—
Число некондиционных разломов по тектонической карте ** n_1	3 5	3 5
Тип рельефа вкrest простираения разлома **	—	—
Тип рельефа вдоль простираения разлома **	—	—
Число пятен разновозрастных пород на геологической карте ** n_3	8	8
Число параллельных разломов *** n_4	2 3 1	2 3 2
Число разломов *** n_5	3 1	— 1
Число пересечений и концов разломов *** n_6	2 1	2 1
Число пересечений разломов *** N_2	—	—
Угол между основным направлением системы Сан-Андреас и направлением разлома α , градус	10 20	0 10

* Вычисление в круге радиусом $r=12,5$ км.

** $r=25$ км.

*** $r=50$ км.

рассмотреть комбинации параметров и в ε -эквивалентных признаках.

Может возникнуть вопрос: почему из эквивалентных признаков в голосовании участвует только один? Ответ: остальные признаки не несут новой информации о разделении объектов на классы.

Эквивалентные и ε -эквивалентные признаки были получены для задачи прогнозирования мест сильных землетрясений в Калифорнии с помощью алгоритма, описанного в § 7 гл. I со следующими дополнениями: использованы все параметры, первоначально выбранные для распознавания, а не только те, которые вошли в решающее правило (табл. 10); пороги K_i и \bar{K}_i изменены (K_i необходимо взять меньшим, чем в обучении, иначе не найти все ε -эквивалентные признаки). Величина K_i была умножена на $(1-\varepsilon)$, и положено $\varepsilon=0,25$, $K_i=4$, $\bar{K}_i=1$. Нашлось очень много (346) эквивалентных и ε -эквивалентных признаков с выбранным ε . Были рассмотрены только 117 из них, для которых $|f_2| \geq |f_1|$. Здесь $|f_1|$ — число объектов в f_i , $i=1$ относится к характерному признаку, $i=2$ — к ε -эквивалентному. Одно семейство эквивалентных признаков дано на рис. 50. Три прямоугольника, последовательно соединенных по направлению стрелок, соответствуют некоторому признаку. Направление всех стрелок можно, конечно, одновременно заменить на обратное. Прямоугольники, соединенные двумя стрелками, со-

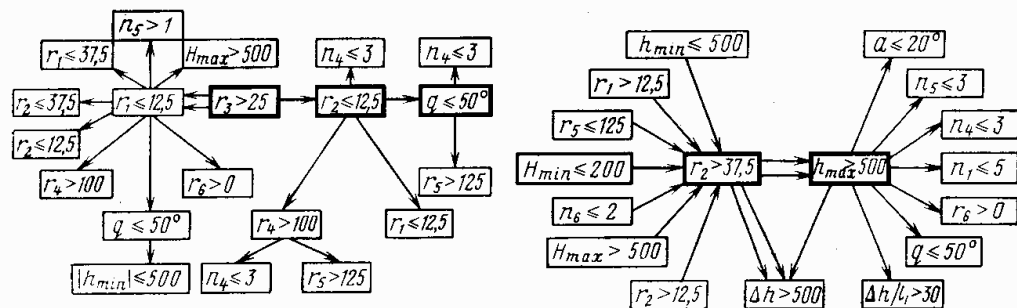


Рис. 50. Семейство ε -эквивалентных признаков

ответствуют признаку, состоящему из двух утверждений (вторая стрелка не должна приниматься во внимание при составлении других признаков). Характерный признак выделен жирным шрифтом целиком (обе стрелки и все три четырехугольника).

На основе изложенной схемы анализа в работе [35] была проведена геологическая интерпретация семейства ε -эквивалентных признаков. Расстояние до ближайшего конца или пересечения разломов r_2 — доминирующий параметр. Он должен быть мал для В и достаточно велик для Н признаков. Основания для этого вывода следующие.

1. В шести из восьми семейств В все признаки, кроме одного, содержат условие, что r_2 достаточно мало; в двух оставшихся группах половина признаков содержит то же условие. Этого одного было бы достаточно, чтобы принять вывод. В самом деле, различные признаки из одной группы существуют на почти совпадающих множествах объектов. Поэтому было бы достаточно, чтобы рассматриваемое условие выполнялось хотя бы в одном признаке в группе.

2. В восьми из одиннадцати групп Н по крайней мере два признака имеют условие, что r_2 достаточно велико.

3. В двух группах (исключения, упомянутые в п. 1) все признаки, в которых нет ограничения на r_2 , имеют взамен следующее условие: расстояние до ближайшего главного разлома r_1 достаточно мало и (или) $n_5 > 1$ (n_5 — число главных разломов на расстоянии до 50 км от точки). Оба эти условия косвенно указывают на близость пересечения разломов.

4. Проверка устойчивости распознавания при исключении параметров также указывает, что r_2 играет решающую роль.

Как ни важно расстояние r_2 , оно не является решающим само по себе: не все концы и пересечения лежат в областях В. Например, как видно из рис. 51, $r_2 \leq 37,5$ км не только для всех точек В,

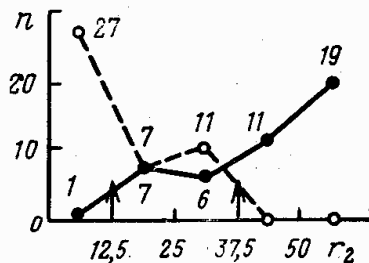


Рис. 51. Распределение значений r_2 для Калифорнии

Роль различных параметров в признаках В и Н

Параметр	Характерное значение	Признак В	Признак Н		
			$r_2 > 12,5$ км	r_2 не указано	$r_2 > 37,5$ км
Высота:					
h_{\max} или h_{\min}	Мало	17	—	—	30
H_{\max} или H_{\min}	Велико	1	5	18	19
Изверженные породы	Присутствуют	—	7	5	7
	Отсутствуют	10	—	—	—
Площадь рыхлых пород q	Мало	5	—	1	1
	Велико	11	2	—	9
Водный резервуар r_6	Близко	2	—	—	11
	Далеко	—	2	4	1
Угол α	Мал	2	—	—	1
	Велик	—	—	—	—
Число пятен пород на геологической карте n_3	Мало	2	—	—	—
	Велико	—	13	4	1
Расстояние до выделенной точки r_5	Мало	—	3	3	2
	Велико	18	—	—	6

но и для 14 из 44 точек Н. Итак, r_2 можно использовать лишь в комбинации с некоторыми другими параметрами. Разберем их.

Статистика некоторых параметров в признаках В и Н дана в табл. 11. В ней нет r_2 и r_1 , которые уже рассматривались выше. Сравним признаки трех типов точек.

В: точки лежат близко к концам или к пересечениям разломов.

НД: точки Н, лежащие далеко от концов или пересечений разломов; $r_2 \geq 37,5$ км.

НБ: остальные точки Н; r_2 не указано или больше 12,5 км.

В табл. 12 указано какие, помимо r_2 и r_1 , параметры принимают разные значения в точках В, НБ, НД.

Заметим, что вблизи пересечений по крайней мере одна из мер высоты должна быть мала для точек В и велика для точек Н. Единственное исключение — условие $H_{\max} > 500$ м в одном из признаков В. Однако эта группа содержит условие $h_{\max} \leq \leq 500$ м; таким образом, в действительности высота должна быть мала рядом с пересечением и велика дальше от него. Для точек НД некоторые признаки имеют большую высоту, а некоторые — малую. Это означает, что нет явных ограничений на высоту точек Н вдали от пересечений, хотя значение высоты в комбинации с некоторыми другими параметрами может остаться и незамеченным. Из работы [35] следует, что боль-

Характерные значения параметров

Параметр	Тип точек		
	В	НБ	НД
Высота (одна из мер) Изверженные породы	Мала Отсутствуют	Велика Присутствуют	Любая Присутствуют
Площадь рыхлых толщ	Велика	Любая?	Мала
Число пятен пород	Мало	Велико	Велико
Расстояние до ближайшего водного резервуара	Мало?	Велико?	Мало
Угол между преобладающим простираанием системы Сан-Андреас и простираанием разлома	Мал	—	Велик?
Расстояние до точки	Велико	Мало	Любое

Примечание. Знак вопроса означает, что это утверждение относится к небольшому числу групп ε -эквивалентных признаков.

шинство других признаков В может быть также интерпретировано как косвенное указание на небольшую высоту.

Отсутствие изверженных пород часто связано с депрессиями, заполненными рыхлыми толщами. Выходы изверженных пород на рассматриваемой территории распространены в основном в приподнятой западной части Южной Калифорнии, тогда как эпицентры и соответствующие подклассы находятся в ее восточной части, в депрессиях, где рыхлые осадочные породы покрывают все породы, включая изверженные, если они есть. Несколько массивов изверженных пород имеется в Поперечных хребтах и отдельные — в Береговых, однако они далеки от точек В.

Большая площадь рыхлых толщ прямо указывает на депрессию. Число пятен пород на геологической карте n_3 на первый взгляд играет не ту роль, которая ожидалась, так как большое n_3 , очевидно, связано с повышенной раздробленностью коры, характерной для В [28, 29]. Однако это противоречие кажущееся: не любая, а неотектоническая раздробленность характеризует признаки В согласно [28], тогда как n_3 отражает всю тектоническую историю. Анализ мест с большим и малым n_3 позволяет считать, что малые n_3 косвенно указывают на понижение (по тем же причинам, что отсутствие изверженных пород).

Расстояние r_6 от ближайшего водного резервуара малó в признаках В, что соответствует упомянутым выше указаниям на связь точек В с малыми высотами. Здесь можно вспомнить современные идеи о роли воды в спусковом механизме землетрясений. Однако для таких далеких сопоставлений пока нет

оснований, тем более что для многих точек малое r_6 указывает лишь на близость океана.

Малое значение угла α между преобладающим простиранием системы Сан-Андреас и направлением разлома характерно для признаков В. Это имеет очевидное объяснение, так как рассматриваются землетрясения со сдвигом в очаге, а тектонические сдвиги проходят здесь вдоль системы Сан-Андреас. Можно было бы ожидать, что большее α будет характерно для признаков В, так как большие напряжения могут концентрироваться на изгибах этой системы. Однако в этом случае подвижка скорее будет направлена вкрест простирания.

Расстояние r_5 до точки пересечения системы Сан-Андреас с Поперечными хребтами велико в признаках В, вероятно, потому, что в Поперечных хребтах подвижки в очагах будут скорее всего не сдвигами, а сбросами или взбросами.

Мы не рассматриваем некоторые параметры, роль которых в признаках В и Н пока непонятна, хотя и незначительна: расстояние r_3 до геотермальной области (велико в 13 и мало в четырех признаках В), число n_4 параллельных разломов (мало в шести признаках В) и др.

Основной вывод качественно можно сформулировать так. Области вокруг точек В — это окрестности пересечений или концов разломов, испытывающие в новейшее время специфические опускания, выраженные в рельефе и геологии. Специфичность связана с тем, что это — опускания, сопровождающие интенсивные сдвиговые движения (как «присдвиговые рифты»). Видимо, мы не смогли адекватно описать такие опускания каким-либо одним параметром.

Напрашивается более грубая формулировка этого вывода: эпицентры приурочены к опускающимся морфоструктурным узлам. Однако такое упрощение кажется чрезмерным. Скорее следует отметить, что минимальные и максимальные высоты одновременно малы в большинстве точек В и велики в большинстве точек Н. Это означает, что точки В характеризуются сильным относительным понижением на фоне слабого поднятия, соответственно точки Н характеризуются сильным, но менее контрастным поднятием (кроме высот на это указывают также сочетания форм рельефа).

§ 3. ВОЛНЫ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ НА КРУПНЫХ РАЗЛОМАХ

Проблема прогноза мест возникновения сильных землетрясений, к которой мы обращались неоднократно, является частью более общей проблемы полного прогноза землетрясений (прогноза места, времени и магнитуды землетрясения). В последние два десятилетия проблеме прогноза землетрясений посвящено много работ. Основная масса работ посвящена поиску и проверке предвестников землетрясений. Основанием для этого

направления служит естественное соображение о том, что процесс в очаге землетрясения не может развиваться мгновенно и должен иметь историю. Следовательно, если регистрировать всевозможные характеристики среды в районе землетрясения, то можно уловить этот процесс развития землетрясения, протекающий до самого землетрясения. Ясно, что такой подход не требует четко очерченной модели развития землетрясения. Все, что измеряется в практике обычных геологических и геофизических работ и может изменяться в обозримое время, становится предметом изучения: не обнаружатся ли изменения, связанные с приближающимся землетрясением (предвестники землетрясения). Такому изучению подвергаются электрическое, магнитное, сейсмическое, акустическое поля, состояние ионосферы и атмосферы, химический и изотопный состав вод и газов, дебиты источников и скважин, гидростатические уровни воды в колодцах, смещения блоков земной коры, поведение растений и животных.

Большинство работ этого направления страдает одним и тем же методическим недостатком. При доказательстве значимости того или иного предвестника демонстрируются примеры, подтверждающие связь данного предвестника с некоторым числом землетрясений. При этом, во-первых, очень часто не определен класс землетрясений, на котором работает данный предвестник (географический район, тип движения в очаге, глубина эпицентра, интервал магнитуд), во-вторых, почти всегда не исследована статистика ошибок, в первую очередь ложных тревог (случаев, когда предвестник не сопровождается землетрясением). Все это делает невозможным корректную оценку значимости исследуемого предвестника.

Резко отличаются уровнем формализации и надежностью оценки значимости исследуемых предвестников работы коллектива ученых под руководством В. И. Кейлис-Борока (Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта АН СССР). В этих работах предложен и исследован ряд сейсмических предвестников сильных землетрясений для многих районов мира.

Другое направление работ по прогнозу места и времени землетрясений связано с поиском периодичностей во временных рядах землетрясений. Очень часто эта периодичность связывается с действием внешних (космических) факторов: положением Луны, Солнца и планет. Иногда ставится задача обнаружения периодичности чисто эмпирическим путем лишь на основе анализа каталогов землетрясений. Такая постановка проблемы в корне отличается от других отсутствием опоры на внешние факторы и попыткой установить внутренние закономерности сейсмического процесса в том или ином регионе. Такой подход представляется исключительно важным; он направлен на поиск внутренних критериев решения задач. Этот поиск привел к выявлению принципов упорядоченности (в задачах определения нефтенасыщенности пластов и корреляции разрезов),

устойчивости описания (в задачах выделения объектов, расчленения разрезов, кластерного анализа), перспективного соответствия (в задачах исследования структуры слоистых толщ).

С этих позиций займемся поиском внутренних закономерностей пространственно-временной картины сейсмичности Земли, т. е. поиском закономерностей, содержащихся в каталогах сильных землетрясений.

Какого рода взаимосвязи можно ожидать между землетрясениями? Во-первых, можно ожидать одновременности возникновения землетрясений. Причиной этого может служить глобальный спусковой механизм, например изменение скорости вращения Земли и рост напряжений в земной коре. Каталоги отмечают группирование землетрясений во времени, однако степень его очень слаба. Можно говорить лишь о периодах повышенной и пониженной глобальной сейсмической активности. Во-вторых, можно ожидать, что землетрясения воздействуют друг на друга. Естественно, что это взаимодействие не может быть мгновенным. Оно должно распространяться с конечной скоростью. В первую очередь нужно рассмотреть простейший случай постоянной скорости.

В литературе отмечались последовательности землетрясений («цепочки»), распространявшихся вдоль разломов (например, на Аляске, в Анатолии [47]). Однако впервые попытка строгой проверки гипотезы о миграции землетрясений с постоянной скоростью была предпринята, очевидно, в работе [5].

Рассмотрим систему координат (x, T) , где T — время, а ось x направлена вдоль оси разлома. Тогда каждое землетрясение в зоне этого разлома может быть представлено точкой на плоскости (x, T) , где x — координата проекции эпицентра на ось разлома, а T — время землетрясения. Утверждение о миграции эпицентров землетрясений вдоль разлома с постоянной скоростью эквивалентно утверждению, что на плоскости (x, T) землетрясения лежат на одной прямой. Можно сказать, что эта прямая представляет собой след возмущения, распространяющегося вдоль разлома и инициирующего по дороге землетрясения. Наклон этой прямой определяется скоростью распространения возмущения.

Исследование такой гипотезы имеет смысл только в том случае, если это возмущение не единственное в истории данного региона. В таком случае на плоскости (x, T) должны бы присутствовать следы движения нескольких возмущений. Другими словами, землетрясения на плоскости (x, T) должны бы лежать на множестве параллельных прямых, представляющих последовательность возмущений, прокатывающихся одна за другой вдоль разлома. Именно такая модель пространственно-временной взаимосвязи землетрясений на разломе и была исследована в работе [5].

Был применен формальный алгоритм выделения указанных выше возмущений. Строится функция $\Sigma(\theta, \epsilon)$, характеризующая

степень согласованности набора событий $\{x_i, t_i\}$ с системой параллельных прямых, наклоненных к оси x под углом θ . Функция $\Sigma(\theta, \varepsilon)$ выбрана в виде $\Sigma(\theta, \varepsilon) = \sum_{k=1}^L (m_k - 1)^n$, где n — целое

число; L — число прямых; m_k — число событий, лежащих на одной прямой; m_k и L зависят от θ . При заданном θ прямые выделяются так. Вычисляем координаты z_i — проекции $\{x_i, t_i\}$ на перпендикуляр к рассматриваемой системе прямых: $z_i = c_1 t_i \cos \theta + c_2 x_i \sin \theta$, где c_1, c_2 — заданные константы.

Упорядочим z_i по возрастанию. Определим число событий Δ_i , лежащих в интервале $(z_i, z_i + \varepsilon)$, для всех i . Отбираем интервал с максимальным значением Δ_i (если максимум достигается при нескольких i , берем наименьшее i), обозначим это Δ_i через m_i . События, попавшие в отобранный интервал, лежат в полосе шириной ε ; будем считать их принадлежащими одной прямой. Исключим эти события из рассмотрения, снова определим все Δ_i и аналогично предыдущему находим максимальное Δ_i . Эта процедура повторяется до тех пор, пока все Δ_i не будут равны единице. Затем вычисляем $\Sigma(\theta, \varepsilon)$ для данного θ . Ищем $\bar{\Sigma}, \bar{\theta}$, где $\bar{\Sigma} = \Sigma(\bar{\theta}, \varepsilon) = \max_{\theta} \Sigma(\theta, \varepsilon)$. Если этот максимум ста-

тистически значим, то он указывает на существование возмущения, распространяющегося со скоростью $v = -c_2/c_1 \operatorname{ctg} \theta$. Из рассмотрения исключались значения θ , близкие к 90° и к 0 ; в первом случае Σ отражает лишь неравномерную плотность эпицентров в пространстве, во втором — рои землетрясений.

Значимость рассматриваемых прямых проверялась путем сравнения $\Sigma(\bar{\theta}, \varepsilon)$ для каталога реальных землетрясений и для псевдослучайных точек $(\tilde{x}_i, \tilde{t}_i)$, вероятностное распределение которых приближенно соответствовало реальному каталогу. Величина \tilde{t}_i считалась равномерно распределенной на интервале, к которому относятся реальные наблюдения; за распределение \tilde{x}_i принималась сглаженная гистограмма наблюдавшихся значений.

Статистический тест проводился следующим образом. Находилось K выборок из N пар псевдослучайных чисел $(\tilde{x}_i, \tilde{t}_i)$, где N — число землетрясений в реальном каталоге. Для каждой выборки по описанному алгоритму находились значения $\bar{\Sigma}_j, \bar{\theta}_j$, $j = 1, 2, \dots, K$. На плоскости $(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$ определялся контур, внутрь которого попадает PN всех точек $(\bar{\theta}_j, \bar{\Sigma}_j)$. Для определения контура строим поверхность $\bar{K}(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$, где \bar{K} есть число точек $(\bar{\theta}_j, \bar{\Sigma}_j)$ в некоторой окрестности $(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$. Рассматриваемый контур есть пересечение этой поверхности с плоскостью $\bar{K} = c(P)$. Значение P , при котором найденное для реального каталога $(\bar{\theta}, \bar{\Sigma})$

лежит на таком контуре, есть оценка статистической значимости рассматриваемого эффекта.

Рассматривались нормальные землетрясения с магнитудой $M \geq 6,5$ для трех регионов: чилийского (западное побережье Чили), панамского (Центральная Америка) и калифорнийского (разлом Сан-Андреас). Границы принятых регионов и линии, на которые проектировались эпицентры (наша аппроксимация сейсмоактивных разломов), указаны в табл. 13. Данные о землетрясениях относятся к периоду 1900—1970 гг. Из рассмотрения исключены явные афтершоки и несколько эпицентров, лежащих далеко от основного облака эпицентров вдоль разлома.

Как видно из табл. 13, статистическая значимость найденных максимумов $\Sigma(\bar{\theta}, \varepsilon)$ удовлетворительна. Значение $\bar{\theta}$ и статистическая значимость результата устойчивы к выбору афтершоков и к небольшим вариациям линий проектирования.

В целом можно считать установленным, что в рассмотренных регионах вдоль главных разломов распространяются с севера на юг возмущения, связанные с возникновением сильных землетрясений. Эти возмущения естественно назвать волнами тектонической деформации, поскольку в процессе сильных землетрясений реализуется значительная часть тектонических движений по крупным разломам.

Таблица 13

Скорости распространения волн тектонических деформаций для различных регионов при $n=4$, $c_1=1$, $c_2=-50$, $K=500$, $\varepsilon=40$

Регион	Координаты границы региона, градус		Координаты линии проектирования, градус		N	v км/год	Σ	P
	φ	λ	φ	λ				
Чилийский	16	85			63	53	1450	0,922
	16	55	17	70				
	55	55	55	74				
Панамский	55	85			74	86	1534	0,934
	10	115						
	20	90						
	15	90	21	110				
	15	75	5	75				
Калифорнийский	5	75			50	34	690	0,990
	5	90						
	10	90						
	45	135						
	50	125	47	127,5				
	19	98	18	104				
	19	110						

Дальнейшие исследования показали, что такие волны можно обнаружить и в других регионах. Однако в целом рассматриваемая модель вызывает неудовлетворенность. Во-первых, статистически значимое существование волн тектонических напряжений доказано только за счет тех волн, на которых лежат 5—9 землетрясений. Остается неясным, попадают ли остальные землетрясения (а их большинство) на систему параллельных прямых неслучайно. Во-вторых, на различных разломах волны имеют разные скорости, хотя и одного порядка. Можно было бы пойти по обычному пути и объяснить эти различия индивидуальными особенностями геологической обстановки (а особенности эти действительно существуют).

Дальнейшие работы в этом направлении должны были бы пойти по известным канонам: выявление волн тектонических напряжений на новых разломах, объяснение специфических свойств разлома, совершенствование статистических тестов и т. д. Становилось ясным, что никаких возможностей дальнейшего развития эта модель не содержит. Однако можно было пойти по другому пути и, пренебрегая всеми видимыми различиями, абстрагироваться от конкретной геологической обстановки. Например, можно предположить, что скорости распространения волн вдоль разломов являются лишь кажущимися скоростями. Истинная волна движется не вдоль разлома, а под углом к разлому. Поэтому точка пересечения волны с разломом движется вдоль разлома, инициируя землетрясения, в кажущейся скоростью v_{im} , зависящей от угла α между фронтом волны и направлением разлома. При $\alpha=0$ (движение фронта волны совпадает с направлением разлома) кажущаяся скорость совпадает со скоростью волны.

При таких предположениях волны тектонических напряжений, наблюдаемые на различных разломах, могут являться следствием распространения глобальной волны, движущейся по земному шару с постоянной скоростью. Таким образом, мы совершили важное упрощение модели — избавились от конкретной геологической обстановки. На первый взгляд кажется, что мы обеднили тем самым модель, но оказывается, что мы избавились от конкретного, мешавшего увидеть общее.

Изменение модели привело также к изменению самого характера волны. Прежде мы трактовали волну как волну тектонических напряжений. На разломе реально существуют тектонические напряжения; они распределены неравномерно вдоль разлома и их распределение меняется во времени. Однако возмущение, которое движется по Земле с постоянной скоростью независимо от геометрии и свойств среды, не может быть волной напряжений, распределение которых очень сильно должно зависеть от конфигурации и материала блоков. Следовательно, мы должны рассматриваемую в модели волну освободить пока от физического содержания и трактовать как сигнальную (или информационную) волну, являющуюся спусковым механизмом

землетрясений. Энергия землетрясений запасается в сейсмогенных узлах (см. гл. III). Источником этой энергии являются, очевидно, движущиеся плиты и блоки земной коры.

Глава X

МОДЕЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА ДАННЫХ

§ 1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ ГИПОТЕЗЫ Д-ВОЛН

На основе модели, изложенной в предыдущей главе (движение волн тектонических напряжений вдоль разломов), для поиска взаимосвязи между землетрясениями использована следующая информация: каталоги землетрясений и карта разломов земного шара. Новая модель не использует геологических данных и оставляет лишь возможность использования каталогов землетрясений. В действительности в них есть несколько больше, чем время, координата и магнитуда землетрясений: в них подразумевается сфера, на которой разыгрывается сейсмическая история. И это обстоятельство оказывается исключительно важным.

Поскольку мы рассматриваем волну на поверхности шара, движущуюся с постоянной скоростью, то наиболее простая геометрия возникает в предположении, что фронт волны является окружностью. В этом случае (в предположении однородности шара) фронт волны будет представлять окружность и в любой другой момент времени. Центры всех этих окружностей лежат на одном диаметре сферы. На сфере при этом имеются две особые точки, в которых концентрические фронты волн обращаются в точки. Естественно каждую из этих точек считать источником волн.

Возникает вопрос: где расположить этот источник волн? Если мы имеем дело с абстрактным однородным шаром, то на этот вопрос нет ответа. Однако мы имеем дело не с абстрактным шаром, а с Землей. Если с геологической карты стереть всю геологическую информацию, то на ней останется координатная сетка — знак того, что Земля является вращающимся шаром. И это задает на земном шаре и две особые точки (полюсы вращения) и сетку координат (параллелей и меридианов). Таким образом, единственным обоснованным решением для столь абстрактной модели Земли является решение поместить источник волн на полюс.

Итак, мы определили новую модель сейсмичности. На полюсах возникают возмущения — Д-волны. Они распространяются с постоянной скоростью, и вследствие этого каждая из них в любой момент времени лежит на некоторой широте. Когда Д-волна приходит в сейсмический узел (В-узел), в ко-

тором накопилось достаточно энергии, там происходит землетрясение. Тем самым не каждый приход Д-волны в В-узел вызывает землетрясение. Полученную модель нельзя считать сконструированной произвольно. В ее основании лежит единственная произвольная гипотеза о том, что землетрясения индуцируются глобальными возмущениями, распространяющимися по Земле. Вся дальнейшая детализация не была произвольной, а определялась правдоподобными соображениями о простоте, однородности, постоянстве и симметрии — этими всеобщими регулятивами теоретических построений. Вместе с тем модель получилась мало правдоподобной и это потребовало ее проверки на фактическом материале, в данном случае на каталогах землетрясений.

Введем в рассмотрение плоскость (φ, T) , где φ — географическая широта, а T — время. Положение каждого землетрясения на этой плоскости определяется широтой его эпицентра φ и временем возникновения T . Последовательно проходящие по Земле Д-волны представляются семейством параллельных прямых. Если землетрясение попадает на одну из этих прямых, то будем говорить, что это землетрясение индуцировано одной из Д-волн.

Попытаемся обнаружить существование Д-волн в различных районах Земли. Для этого будем проверять гипотезу, что на плоскости (φ, T) землетрясения данного региона с магнитудой выше M_0 ложатся на систему параллельных прямых (утверждение А).

Выбор региона диктовался следующими соображениями. Во-первых, это были регионы, которым посвящены работы по определению мест, где возможны сильные землетрясения: Средняя Азия, Закавказье, Анатолия, Юго-Восточная Европа, Калифорния, Италия, Франция [18, 29, 35]. Во-вторых, это были регионы, которые использовались в данной работе для других целей (например, Арктика). В-третьих, это был ряд регионов, выделенных Гутенбергом и Рихтером. Наконец, были выбраны регионы, диктуемые существом рассматриваемой гипотезы, — широтные полосы, опоясывающие всю Землю, и симметричные относительно экватора.

Уточним смысл утверждения А. В буквальном понимании оно тривиально, ибо через любое множество точек можно провести систему параллельных прямых под любым углом. В общем случае число прямых, на которых лежат эти точки, равно числу точек N . Нетривиальной ситуация будет тогда, когда на некоторых прямых будут лежать по две или более точек, иначе говоря, когда число прямых L будет меньше числа точек N . Величину $N - L$ можно выбрать в качестве меры справедливости утверждения А (в его нетривиальном смысле).

Вследствие того что координаты эпицентров землетрясений определены с ошибкой, точки будут ложиться на прямую с некоторым разбросом. Поэтому утверждение «лежат на прямой»

фактически необходимо понимать как «лежат в полосе шириной ϵ ».

В обобщенном виде выбранную меру, как это уже было сделано выше, можно задать выражением

$$\Sigma(\theta, \epsilon) = \sum_{k=1}^L (m_k - 1)^n. \quad (10.1)$$

где n — целое число; L — число прямых; m_k — число точек, лежащих на одной прямой.

В величину Σ вносит наибольший вклад прямая с наибольшим числом точек. При любом n Σ достигает максимума, когда все точки лежат на одной прямой. Изложив методику, которой будем пользоваться, наметим план исследований.

1. В избранном для исследования регионе отберем из каталога землетрясения с $M \geq M_0$, построим для них функцию $\Sigma(\theta, \epsilon)$ и определим угол θ_0 , при котором Σ достигает максимума.

2. Получив при $\theta = \theta_0$ максимум $\Sigma_m = \Sigma(\theta_0)$, можем исследовать его значимость, как это описано выше (см. гл. IX).

В табл. 14 приведены регионы, в которых был обнаружен значимый максимум функции $\Sigma(\theta)$. Графики $\Sigma(\theta)$ представлены на рис. 52. Во всех случаях угол θ оказался близким к $\pm 34^\circ$. При принятом масштабе (10 лет = 1°) это соответствует скорости Д-волн $v = 0,15^\circ$ в год.

Таким образом, в различных регионах были обнаружены Д-волны, идущие в разных направлениях: в одних регионах — в направлении полюса, в других — в направлении экватора. И все же в одном регионе (в Калифорнии) удалось зарегистри-

Таблица 14

Характеристика регионов

Район	N	M_0	ϵ , км	η	θ_0 , градус
Калифорния	24	6,0	25	2	34
Юго-Восточная Европа и Малая Азия	17	7,2	25	2	35
Алеутские о-ва	5	8,0	25	2	-35
Аляска	12	7,0	25	2	-35
Южное Чили, Южные Сандвичевы о-ва, Новая Зеландия	8	7,5	25	1	35
Глубоких и промежуточных землетрясений всего мира	35	7,9	25	1	33
Весь мир	84	8,0	50	1	35
			30	1	-34
Центральная Калифорния	22	5,0	10	2	-34
				2	36
Франция	5	5,6	10	1	33
Италия	15	5,5	10	2	35

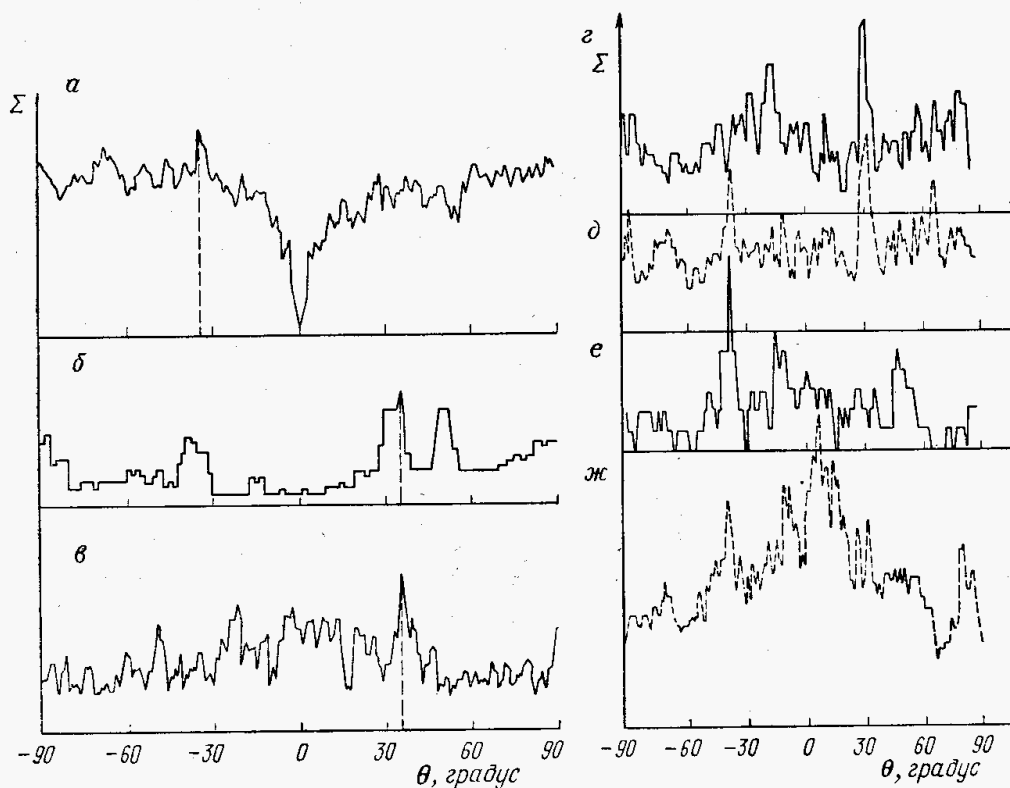


Рис. 52. Функция $\Sigma(\theta)$ для различных регионов:

a — весь мир 14° , *б* — Франция, *в* — Алеутские острова и Аляска, *г* — Юго-Восточная Европа и Малая Азия, *д* — Калифорния, *е* — Аляска, *ж* — Чили

ровать волны, идущие в обоих направлениях (на рис. 52, *д* функция $\Sigma(\theta)$ имеет максимумы на углах $+34^\circ$ и -34°).

Следует отметить результаты, полученные для регионов, в которых ранее были проведены работы по определению мест возможного возникновения сильных землетрясений методами распознавания: Калифорния, Закавказье, Анатолия и Юго-Восточная Европа, Италия, Средняя Азия.

В четырех из пяти регионов были обнаружены Д-волны со скоростью $0,15^\circ$ в год.

При исследовании Тихоокеанского сейсмического кольца положительные результаты были получены для следующих регионов: Алеутские о-ва, Аляска и Британская Колумбия, Калифорния, Южное Чили и Южные Сандвичевы о-ва, Новая Зеландия. Во всех этих регионах обнаружены Д-волны со скоростью $0,15^\circ$ в год (рис. 53). Отрицательные результаты были получены для Центральной Америки, западного и северо-западного обрамления Тихого океана, Восточной Азии.

Изложенные выше результаты позволяют признать гипотезу о существовании глобальных Д-волн, служащих спусковым механизмом землетрясений, правдоподобной. Вместе с тем уместно заметить следующее. Во многих случаях получаемые уровни

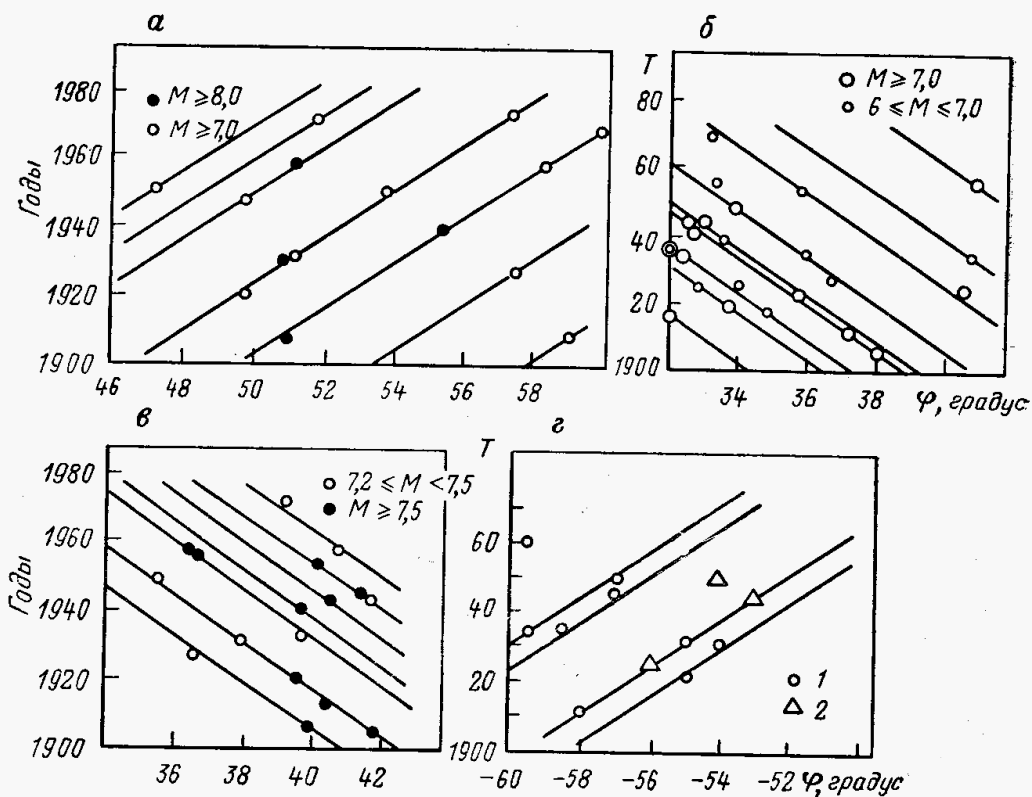


Рис. 53. Д-волны для различных регионов.

а — Алеутские острова и Аляска, б — Калифорния, в — Юго-Восточная Европа и Малая Азия, г — Южно-Антийские о-ва (1) и Новая Зеландия (2)

значимости при проверке различных гипотез достигают значений 0,95 и выше. Однако к этим величинам следует относиться осторожно, поскольку неизвестно, какой ценой, в результате какого перебора был получен оцениваемый факт. Сколько регионов было рассмотрено, прежде чем набрался десяток с нужными характеристиками? Сколько исследовано различных каталогов в одном регионе, сколько порогов по магнитуде было испытано, сколько значений свободных параметров v и n было перебрано при использовании формулы (10.1)? Все это не поддается точному учету. Поэтому приведенные выше сведения о способе выбора регионов, порога M_0 и других параметров являются скорее подтверждением, чем доказательством надежности полученных оценок. Как правило, принятие новых концепций не происходит на основании какого-либо экспериментального факта, для которого получена статистическими методами высокая надежность. Поэтому в дальнейшем основной упор будет сделан на доказательство разнообразных следствий гипотезы о существовании Д-волн, а получаемые в отдельных случаях статистические оценки должны рассматриваться лишь как деталь общей картины.

Получив значение скорости Д-волн ($v=0,15^\circ$ в год), в даль-

нейшем можно вести поиск Д-волн не по статистической значимости получаемого максимума функции $\Sigma(\theta)$, а по значению угла θ_0 , при котором величина $\Sigma(\theta)$ достигает максимального значения. Если величина $\Sigma(\theta)$ исследуется в интервале углов $10-80^\circ$ с шагом в 1° , то вероятность случайного выпадения угла $\theta = 34 \pm 1^\circ$ равна $3/70 \approx 0,04$. С этих позиций оценивались результаты исследования функции $\Sigma(\theta)$ для сильнейших землетрясений мира ($M \geq 8$), расположенных в широтных поясах, симметричных относительно экватора. Для трех пар полос ($|\varphi|$ в интервалах $14-28$, $28-45$, $45-61^\circ$ соответственно) и для суммарной полосы θ оказалось равным 34° .

Это свидетельствует о существовании глобальной системы Д-волн, инициирующих сильнейшие ($M \geq 8,0$) землетрясения Земли. Такой же результат получен для сильнейших глубоких и промежуточных землетрясений всего мира.

Результаты, приведенные в табл. 14 для сильнейших поверхностных землетрясений мира, получены при использовании каталога Дуды. Особенность этого каталога состоит в том, что магнитуды землетрясений определены по записям одного прибора, работавшего в течение шестидесяти лет на станции Упсала (Швеция). Возможно, что каталог дает более правильное упорядочение землетрясений на магнитуде, хотя и может содержать постоянную ошибку.

Каталог сильных глубоких и промежуточных землетрясений взят у Рихтера. Во всех случаях каталоги пополнены землетрясениями последних лет.

Для выявления других проявлений Д-волн расширим используемые данные. До сих пор мы пользовались каталогами землетрясений, составленными по инструментальным данным и относящимися к XX в. Попытаемся привлечь исторические данные, собранные в каталоги землетрясений, происшедших до начала XX в. Погрешность определения времени землетрясений в этих каталогах составляет часы или дни, что вполне нас удовлетворит. Однако низкая точность определения координат эпицентров может существенно исказить картину. Поэтому мы будем обращаться к каталогам исторических землетрясений с наибольшей точностью определения координат эпицентров. Это — каталоги для густонаселенных районов с древней культурой; Юго-Восточной Европы, Малой Азии, Японии, Калифорнии. Все эти регионы лежат в интервале широт $30-40^\circ$. Д-волны, которые в XIX в. располагались на этих широтах, переместились за прошедшие 100 лет на 15° . Те волны, которые двигались на север, в XX в. оказались в районе Алеутских о-вов и Аляски — регионов, в которых были обнаружены Д-волны.

Если справедлива наша гипотеза, то сильные землетрясения XIX в. должны лежать на этих же волнах. Это действительно так, что видно из рис. 54 (кружками обозначены эпицентры сильных землетрясений).

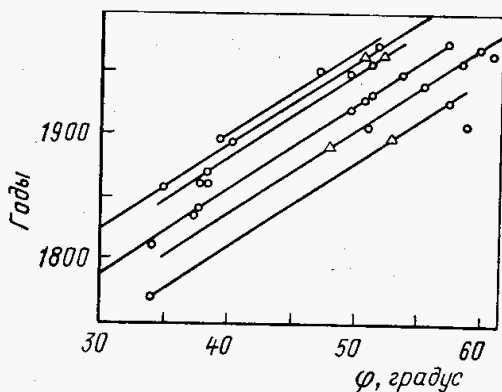


Рис. 54. D-волны XIX и XX вв.

Итак, мы получили новые подтверждения гипотезы о существовании D-волн, являющихся спусковым механизмом сильных землетрясений. Вряд ли этих доказательств достаточно для того, чтобы принять такую странную модель, но эта модель заслужила право на дальнейшее развитие.

Анализируя описанную выше модель распространения D-волн, естественно задаться вопросом о механизме и за-

кономерностях генерации D-волн. Чем замечательны точки, из которых исходят D-волны? Это полюсы вращения Земли. Из этого следует, что генерация D-волн должна быть связана с режимом вращения Земли (в противном случае источником D-волн могла бы быть любая другая точка Земли). Если предположить постоянство скорости вращения Земли, то при этом возмущения либо вообще не генерируются (ибо один момент времени ничем не отличается от другого), либо может существовать стационарный процесс периодической генерации D-волн. Поскольку по имеющимся данным периодичность D-волн не обнаруживается, то причину их возникновения нужно искать в неравномерности вращения Земли. Можно предположить, что D-волны рождаются на полюсах в моменты изменения режима вращения Земли (например, когда скорость вращения Земли ω достигает локального минимума или максимума). В этом случае из соображений симметрии немедленно следует, что D-волны должны возникать на полюсах одновременно.

Гипотезу о возникновении D-волн в моменты, когда скорость вращения Земли достигает локального минимума, можно проверить двумя способами.

1. Пусть φ_i — широта эпицентра, а T_i — время возникновения i -го землетрясения. Если в момент $T_i^* = T_i - (90 - \varphi_i)/v$ на Северном полюсе образуется D-волна, то в момент T_i она окажется на широте φ_i и совпадет с эпицентром i -го землетрясения. Поэтому мы будем проверять, отвечает ли T_i^* одному из минимумов скорости вращения Земли. Совпадение будет означать, что i -е землетрясение возникло в момент прохождения через эпицентр одной из D-волн. При погрешности определения эпицентров в 25 км погрешность T_i^* составляет около 1,5 года. Исходя из этого определения, будем проверять гипотезу о неслучайности попадания T_i^* в трехлетние интервалы,

Изменение скорости вращения Земли с 1800 по 1967 г.

Год	$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$	T*	Год	$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$	T*	Год	$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$	T*
1800	+67		1850	-82		1900	-411	
1801	+65		1851	-93		1901	-484	
1802	+59		1852	-67		1902	-507	
1803	+51		1853	-42		1903	-484	
1804	+43		1854	-19		1904	-449	
1805	+57		1855	+16	*	1905	-444	
1806	+33		1856	-18		1906	-448	
1807	+29		1857	-21		1907	-440	*
1808	+25		1858	-39		1908	-446	
1809	+21		1859	-10		1909	-465	
1810	+16		1860	+48		1910	-470	
1811	+11		1861	+136		1911	-439	
1812	+7		1862	+198		1912	-434	
1813	+7		1863	+157		1913	-400	
1814	+7		1864	+51		1914	-345	
1815	+10		1865	+1		1915	-277	
1816	+12		1866	+60		1916	-285	
1817	+11		1867	+146	*	1917	-292	
1818	-1		1868	+166		1918	-248	
1819	-17	*	1869	+172		1919	-185	
1820	-14		1870	-272		1920	-169	
1821	+32		1871	+422		1921	-193	
1822	+120		1872	+487		1922	-201	
1823	+199		1873	+428		1923	-177	
1824	+181		1874	+326		1924	-140	
1825	+93	*	1875	+256		1925	-112	
1826	+44	*	1876	+201		1926	-80	
1827	+59		1877	+103	*	1927	-41	
1828	+79		1878	+6		1928	-15	
1829	+70		1879	+5		1929	-21	
1830	+31		1880	+60		1930	-37	
1831	-18	*	1881	+74		1931	-40	*
1832	-4	*	1882	+48		1932	-37	
1833	+104	*	1883	-7		1933	-33	
1834	+196		1884	-93		1934	-2	
1835	+172	*	1885	-154	*	1935	+38	
1836	+99		1886	-142		1936	-42	
1837	+66	*	1887	-60		1937	0	
1838	+50	*	1888	+29		1938	-47	
1839	+24		1889	+51		1939	-87	
1840	-24		1890	+22		1940	-130	
1841	-50		1891	+5		1941	-164	
1842	-77		1892	+6		1942	-177	
1843	-76		1893	+3		1943	-168	
1844	-57		1894	-15		1944	-147	
1845	-97		1895	42		1945	-139	
1846	+62		1896	-65		1946	-155	
1847	-153		1897	-91		1947	-174	
1848	-89		1898	-140		1948	-179	
1849	-60		1899	-286	*	1949	-161	

Год	$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$	T^*	Год	$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$	T^*	Год	$\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$	T^*
1950	-135		1956	-108		1962	-133	
1951	-122		1957	-126		1963	-164	
1952	-125		1958	-149		1964	-207	
1953	-125		1959	-154	}	1965	-238	
1954	-117		1960	-144		1966	-256	
1955	-108		1961	-130		1967	-277	

соответствующие локальным минимумам скорости вращения Земли.

В табл. 15 приведены данные из работы [49] о неравномерности вращения Земли с 1800 по 1967 г. За этот период отмечается 21 локальный минимум. Три из них (1891, 1906, 1952 гг.) выражены слабо и при сглаживании данных (усреднение по трем точкам) исчезают. Эти три минимума из дальнейшего рассмотрения исключались. Трехлетние интервалы, соответствующие выделенным минимумам, отмечены фигурными скобками. В трех случаях минимум приходится на два соседних года; для этих минимумов взяты интервалы не в три, а в четыре года.

Первый из отмеченных минимумов приходится на 1820 г., и если он породил на полюсе Д-волну, то она за прошедшие 160 лет успеет распространиться примерно на 23° и достигнет широты 67° . Поэтому для проверки нашей гипотезы мы можем использовать только землетрясения полярных областей. Однако в Антарктиде известны лишь очень слабые землетрясения. В Арктике известно 23 землетрясения с $M \geq 6,0$ (табл. 16).

Для 15 из этих землетрясений T_i^* совпадает с одним из минимумов (звездочки в табл. 15). Суммарная длительность минимумов составляет 57 лет, т. е. 0,373 исследуемого интервала времени (153 года). Эти данные позволяют принять гипотезу с вероятностью 0,975.

2. На одну Д-волну попадает несколько землетрясений. Всего в этом регионе можно выделить 14 Д-волн. Проверим, связано ли их образование с выдвинутой гипотезой. Для этого вычислим момент прохождения волны через полюс T^* для каждой из Д-волн этого региона. Для 10 из 14 волн моменты T^* попадают в один из экстремумов. Это позволяет принять гипотезу с вероятностью 0,975.

Обсуждая связь скорости вращения Земли с моделью возникновения Д-волн, необходимо указать на работы А. Стойко, Д. Андерсона и Ф. Пресса о связи землетрясений с изменениями скорости вращения Земли. В работах [40, 49] обнаружена корреляция (отрицательная) сейсмической активности и скорости вращения Земли, т. е. всплескам сейсмической активности (а фактически сильнейшим землетрясениям мира) соответ-

Землетрясения в Арктике (1908—1975 гг.)

Дата	φ, градус	λ, градус	M
14. X. 1908	82	30	6,6
10. IV. 1909	77,5	128	6,75
23. VIII. 1915	78,5	8	6,75
30. V. 1923	77	127	6
20. XI. 1933	73	70,75	7,3
2. I. 1936	79,75	2	6
8. XI. 1943	80	5	6
1. I. 1945	73	70	6,5
8. XI. 1945	83	15	6
10. VII. 19 47	73	71	6
2. II. 1954	83,1	4	6
6. II. 1955	70,7	14,4	6,2
28. VI. 1955	86,6	70,3	6
2. V. 1957	72,1	68	6
29. I. 1959	70,9	7,3	6
28. X. 1960	71,3	9,1	6
19. IV. 1962	69,8	138,8	6,2
4. IX. 1963	71,3	73,1	6,3
25. VIII. 1964	78,2	126,6	6,5
28. XII. 1964	86,7	68,7	6,2
23. III. 1971	71	7	6,2
27. XI. 1972	76,8	107	6
16. IV. 1975	71,5	10,4	6,5

вуют минимумы скорости вращения Земли ω . В работе Ф. Пресса обсуждается вопрос о причинной связи этих двух явлений. Первоначально предпочтение отдавалось гипотезе о том, что изменение скорости вращения Земли вызывает дополнительные напряжения в земной коре, которые и приводят к возникновению землетрясений. Однако позднее выяснилось, что при сильных землетрясениях в движение вовлекаются массы гораздо большие, чем ранее предполагалось, и поэтому землетрясения могут быть причиной заметных изменений скорости вращения Земли. Этой же точки зрения придерживаются О'Коннел и Дзивонский, которые показывают, что изменение амплитуды чандлеровских колебаний Земли в XX в. можно объяснить смещениями масс, вызванными сильнейшими землетрясениями.

Таким образом, можно дополнить модель Д-волн гипотезой о том, что сильные землетрясения приводят к локальному уменьшению скорости вращения Земли, а тем самым к возникновению на полюсах двух Д-волн. Следовательно, модель Д-волн задает автоколебательный процесс: Д-волны инициируют сильные землетрясения, сильные землетрясения вызывают перераспределение масс в земной коре, что приводит к изменению скорости вращения Земли ω , в результате на полюсах рождаются Д-волны, а Д-волны, докатившись до сейсмически активных областей, через сотни лет рожают новые сильные землетрясения.

Итак, мы получили еще одно подтверждение модели Д-волн. Прежде чем продолжить анализ модели, рассмотрим изложенное с точки зрения способов анализа данных.

Во-первых, решающую роль в анализе данных играет модель, которая организует и направляет этот анализ. В этом ясно проявляется отличие той деятельности, которая называется неформальным анализом данных, от деятельности, называемой математической обработкой результатов наблюдений. Представив данные о сейсмичности на плоскости (x, T) (где T — время, x — расстояние вдоль разлома), мы воссоздаем реальную картину распределения сейсмичности во времени и в пространстве и пытаемся зрительно обнаружить в ней какие-либо закономерности. Затем мы выбираем какой-либо математический метод для описания этой закономерности. Однако проектирование на плоскость (φ, T) , где φ — широта, никак не может быть подсказано самими данными, а может быть получено только из теории, из модели. Точно так же привлечение к анализу данных сведений о неравномерности вращения Земли не может быть продиктовано самими данными.

Во-вторых, существует обратное движение мысли — от данных к модели. Например, соображения о широтном расположении фронтов Д-волн и о постоянстве скорости их распространения были подсказаны эмпирическими данными — совпадением во времени и в пространстве Д-волн, выделенных отдельно в Калифорнии и в Малой Азии. Это же относится к гипотезе о дискретном распределении эпицентров по широте (о которой речь далее); вначале этот факт был отмечен в реальном каталоге, а затем осмыслен как теорема. Такой путь весьма характерен для математического, да и всякого другого научного творчества. Часто формулировка теоремы начинается с того, что подмечается закономерность в эмпирическом материале. Одна из лучших программ доказательства геометрических теорем, принадлежащих М. Геллернтеру, использует именно этот прием. Дело в том, что способ доказательства теорем геометрии с помощью комбинирования всех возможных аксиом и теорем оказался нереальным. Очень скоро теоремы начинают повторяться, и чем дальше, тем больше. Приходится искать возможности формулировки теорем до того, как они будут доказаны.

Например, на конкретных примерах (на чертежах) устанавливаются некоторые отношения (например, равенство противоположных углов ромба), затем они формируются как теоремы, а затем уже предпринимаются попытки для их доказательства.

В-третьих, анализ данных обнаруживает свою двойную природу. Кроме анализа результатов некоторых операций (в частности, результатов измерений) он включает в себя анализ моделей. Мы уже прибегали к такого рода анализу и раньше, например при анализе модели Хейтса.

Слабое место в проведенном выше анализе неравномерности вращения Земли мы видим в том, что за то время (с начала XIX в.), для которого нам известна с достаточной точностью скорость вращения Земли, Д-волны не успели дойти до высокосейсмических районов Земли. Поэтому проверку пришлось проводить на основе данных о землетрясениях средней силы, что не вполне адекватно основным положениям модели. Д-волны, которые в XX в. должны были бы прийти в высокосейсмические регионы, «стартовали» с полюсов 300 лет назад и более. Однако в этот период скорость вращения Земли еще не определялась с достаточной точностью и регулярностью. Принятое нами на основе данных [40] совпадение во времени сильных землетрясений и минимумов скорости вращения Земли позволяет преодолеть это затруднение. Будем считать моментами замедления Земли моменты возникновения сильных землетрясений (по некоторым регионам мира имеются каталоги землетрясений за сотни и тысячи лет). В каждый из этих моментов на полюсах должны стартовать две Д-волны. Необходимо проверить, попадают ли происходящие впоследствии землетрясения на эти волны.

Рассмотрим сейсмическую историю двух регионов — Китая и Японии. Эти регионы удовлетворяют условиям, необходимым для осуществления намеченного исследования: 1) для этих регионов характерны очень сильные землетрясения ($M \geq 7,9$); 2) сейсмическая история известна за очень большой период времени; 3) для всех землетрясений указаны магнитуды; 4) эпицентры даны с точностью до $0,1^\circ$. Хотя сейсмическая история восстановлена и для ряда других районов, однако в каждом из них не выполнено какое-либо из перечисленных выше условий. Для Турции, например, сейсмическая история начинается с I в., однако для этого региона не характерны землетрясения с $M \geq 7,9$. Для Южной Америки сейсмическая история известна за 500 лет, однако эпицентры землетрясений указаны с точностью до 1° .

Китай. Сейсмическая история отражена в каталоге крайне неравномерно. На первые 2300 лет (до 1500 г.) приходится одно землетрясение с $M \geq 8,0$, на последующие 400 лет — восемь, а на 75 лет XX в. — шесть таких землетрясений. Чтобы избавиться от такой неравномерности, мы, во-первых, исключим из рассмотрения землетрясения XX в. (после 1903 г.) и, во-вторых, установим различные пороги отбора по магнитуде для разных периодов времени: $M \geq 7,0$ для периода до 1550 г. и $M \geq 8,0$ для периода с 1551 до 1903 г. (табл. 17). Сильнейшее землетрясение первого периода произошло в 1303 г. ($M = 8$), сильнейшее землетрясение второго периода — в 1668 г. ($M = 8,5$). Если в момент возникновения первого из этих землетрясений, т. е. в 1303 г., на Северном полюсе возникла волна,

Сильнейшие землетрясения в Китае до 1903 г.

Номер землетрясения	Год	φ , градус	M	Полюс	T'	$T' + t$	ΔT
1	180	39,4	7,5				
2	512	29,0	7,5	N	180	520	-8
3	734	34,7	7,0				
4	1038	38,4	7,25	S	180	1036	2
5	1125	36,0	7,0				
6	1303	36,3	8,0				
7	1352	35,6	7,0	S	512	1349	3
8	1501	34,8	7,0	N	1125	1483	8
9	1515	26,6	7,5	S	734	1511	4
10	1556	34,5	8,0				
11	1604	25,0	8,0				
12	1668	35,3	8,5	N	1303	1668	0
13	1679	40,0	8,0	N	1352	1685	-6
14	1695	36,0	8,0				
15	1739	38,9	8,0				
16	1833	25,2	8,0				
17	1902	39,5	8,25	S	1038	1901	1

то она достигла широты $\varphi = 35,3^\circ$, на которой лежит второе землетрясение, спустя $t = (90 - \varphi)/v = 365$ лет, т. е. в 1668 г. — в год, когда там действительно произошло сильнейшее землетрясение второго периода.

До 1303 г. отмечены три землетрясения с $M \geq 7,25$: в 180, 512 и 1038 гг. (1, 2, 4 в табл. 17). Если

в 180 г. на Северном полюсе возникла волна, то она достигнет широты φ_2 , на которой лежит землетрясение 2, в 520 г. ($\Delta T = -8$). Если в 180 г. на Южном полюсе возникла волна, то она достигнет широты φ_4 в 1036 г. ($\Delta T = 2$).

Понизив порог до $M = 8,25$ для землетрясений второго периода, используем для анализа еще одно землетрясение (17, 1902 г., $\varphi_{17} = 39,5^\circ$). Волна, возникшая на Северном полюсе в 1038 г., т. е. в год возникновения землетрясения 4, достигает широты $\varphi_{17} = 39,5^\circ$ в 1901 г. ($\Delta T = 1$).

Таким образом, все шесть рассмотренных землетрясений связаны отношениями, указанными проверяемыми гипотезами (рис. 55). Точность попадания землетрясений на волны оказалась очень высокой: среднее $\Delta T = 3$ года, что эквивалентно точности определения широты эпицентра $0,5^\circ$. Гипотеза о том, что такое попадание не случайно, может быть принята с вероятностью больше 0,999.

В табл. 17 даны результаты такого анализа и для остальных более слабых землетрясений.

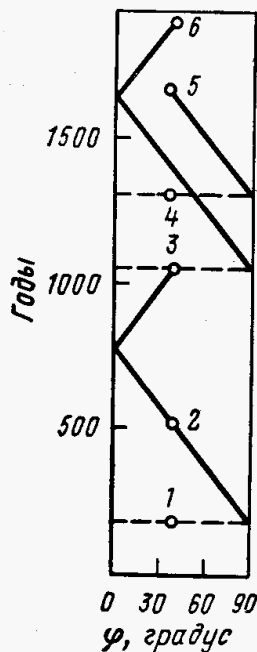


Рис. 55. Связь между сильнейшими землетрясениями Китая

Некоторые из них удовлетворяют проверяемой гипотезе, другие не удовлетворяют. Это связано с тем, что однородность выборки падает с уменьшением магнитуды. Тем не менее для всех землетрясений табл. 17 оцениваемая гипотеза может быть принята с вероятностью больше 0,995.

Япония. Каталог землетрясений за период с 599 по 1903 г. для $M \geq 7,9$ дан в табл. 18. Улучшить его однородность во времени выбором различных порогов по магнитудам не удастся.

Рассмотрим Д-волны, возникшие, согласно гипотезе, в годы этих землетрясений на Южном полюсе и достигшие Японии до 1903 г. Таких Д-волн пять (от землетрясений 1—5). Первая из них достигла Японии в начале XVI в. За последующие 400 лет в Японии произошло десять землетрясений с $M \geq 7,9$. Четыре из них попали на одну из Д-волн (9, 12, 13, 14). Максимум ΔT равен 3 годам. Эти данные позволяют принять проверяемую гипотезу с вероятностью больше 0,995. Однако ни одно из рассматриваемых землетрясений Японии не попадает на волны, идущие от Северного полюса. Таким образом, каталог землетрясений Японии позволил нам подтвердить лишь часть гипотезы.

Полученные результаты подтверждают не только наличие Д-волн и их связь с неравномерностью вращения Земли, но и совпадение моментов возникновения сильнейших землетрясений Земли со временем локальных минимумов скорости вращения Земли. В рамках развиваемой нами концепции моменты сильных землетрясений предопределены заранее: а) положением мест, где возможны сильные землетрясения (а они

Таблица 18

Сильнейшие землетрясения в Японии до 1903 г.

Номер землетрясения	Год	φ, градус	M	Полюс	T'	T' + t	ΔT
1	684	32,5	8,4				
2	745	35,5	7,9				
3	818	35,2	7,9				
4	869	38,5	8,6				
5	887	33,0	8,6				
6	1096	34,8	8,4				
7	1361	33,0	8,4				
8	1498	34,1	8,6				
9	1586	36,0	7,9	S	745	1585	1
10	1605	33,0	7,9				
11	1611	38,2	8,1				
12	1677	38,7	8,1	S	818	1676	1
13	1703	34,7	8,2	S	869	1700	3
14	1707	33,2	8,4	S	887	1707	0
15	1843	41,8	8,4				
16	1854	33,2	8,4				
17	1891	35,6	8,4				
18	1894	42,4	7,9				

неизменны во времени), и б) моментами прихода в эти места Д-волн, которые могут быть вычислены на сотни лет вперед. Следовательно, землетрясения необходимо считать причиной, а изменения скорости вращения Земли — следствием.

Пересечения Д-волн

Перейдем вновь от анализа каталогов к анализу модели. Дальнейший анализ модели приводит к выявлению такого понятия, как пересечение Д-волн. Действительно, рассматривая модель распространения по Земле Д-волн, нельзя не обратить внимание на такую особенность этого процесса, как встреча двух Д-волн, идущих в противоположных направлениях, на одной широте. На плоскости (φ , T) это событие отражается пересечением двух Д-волн. Таким образом, на плоскости (φ , T) имеется множество особых точек, являющихся пересечением Д-волн разного направления. Какую роль могут играть эти точки? Наиболее естественное предположение состоит в том, что именно к этим точкам и приурочены сильные землетрясения (или, может быть, самые сильные).

В большинстве регионов подтвердить эту гипотезу непосредственно не удастся. Однако в одном регионе, в Калифорнии, ситуация оказалась благоприятной. На кривых $\Sigma(\theta)$ видно (см. рис. 52), что кроме максимума на угле $\theta = -34^\circ$ имеется максимум на угле $\theta = 34^\circ$. Это означает, что одни и те же точки лежат как на системе Д-волн, идущих с севера на юг, так и на системе Д-волн, идущих с юга на север, т. е. на пересечениях Д-волн.

Основываясь на гипотезе о приуроченности сильных землетрясений к пересечениям Д-волн и используя данные о более древних землетрясениях, можно показать существование Д-волн и их движение с постоянной скоростью в течение сотен лет. Пусть в момент T на широте $\varphi = 40^\circ$ произошло сильное землетрясение. Это означает, что на этой широте в этот момент встретились две Д-волны. В соответствии с гипотезой о симметричности Д-волн относительно экватора в тот же момент в южном полушарии на широте $\varphi = -40^\circ$ также встретились две Д-волны. Одна из них, двигаясь на север, через 600 лет окажется на широте $\varphi = 50^\circ$ в северном полушарии. Чтобы эта Д-волна оказалась на этой широте в XX в., землетрясение должно было произойти примерно в XIII в.

В табл. 19 даны землетрясения, происшедшие в двух регионах на широтах около 40° , в интервале времени с 1290 по 1360 г. На рис. 54 треугольниками отмечены положения четырех Д-волн спустя 600 лет после того, как они вызвали в Восточной Азии и на Балканах четыре сильнейших (из известных нам) землетрясения в XIII в. Положение всех четырех Д-волн прекрасно совпадает с положением Д-волн, выделенных по землетрясениям XX в. и подтвержденных землетрясениями XIX в.

Сильнейшие землетрясения XIII—XIV вв.

Район	Год	М	I, балл	Ф, градус	λ, градус
Китай	1290	6,75	—	—41,5	—119,3
”	1303	8,0	—	—36,3	—111,7
”	1352	7,0	—	—35,6	—105,3
Малая Азия	1353	—	XI	—40,8	—27,0

Приведенных данных достаточно, чтобы гипотезу признать правдоподобной и использовать в дальнейших построениях. Вместе с тем принятие этой гипотезы создает определенные трудности. Действительно, если полагать, что для провоцирования землетрясений в некотором Д-узле, в котором накоплены тектонические напряжения, достаточно прихода одной Д-волны, то наблюдающаяся периодичность Д-волн (примерно одна волна в 10 лет) обеспечивает реальную частоту возникновения землетрясений в Д-узлах — один раз в несколько десятков лет. Однако принятие новой гипотезы делает необходимое условие возникновения сильных землетрясений (приход в данное место двух Д-волн одновременно) событием редким (примерно один раз в 50 лет). А это противоречит реальной частоте землетрясений в фиксированном месте.

Противоречие это существует в предположении, что места возникновения землетрясений распределены на Земле случайно, и исчезает при условии, что места возникновения землетрясений согласованы с временной последовательностью Д-волн.

Взаимосвязь места и времени возникновения землетрясений

Простота и ясность ситуации, изображенной на рис. 55, легко позволяет отметить и ее особенность: шесть рассмотренных землетрясений разбиваются на две группы: 1, 2, 3, 6 и 4, 5. Внутри каждой из групп землетрясения связаны между собой Д-волнами: каждое из последующих землетрясений в группе лежит на одной из Д-волн, порожденных предыдущими землетрясениями. Внутри каждой из групп эпицентры лежат на близких широтах: в первой группе на широтах 38—39°, во второй — на широтах 35—36°. Если это не случайность, а проявление закономерности, то это означает, что места (широты) и времена возникновения землетрясений взаимообусловлены. Ранее при анализе этой гипотезы мы уже пришли к такой возможности из других соображений. Поэтому проанализируем эту ситуацию подробнее.

Моменты возникновения сильных землетрясений являются одновременно моментами возникновения пары Д-волн на полюсах, которые спустя сотни лет иницируют на своем пути

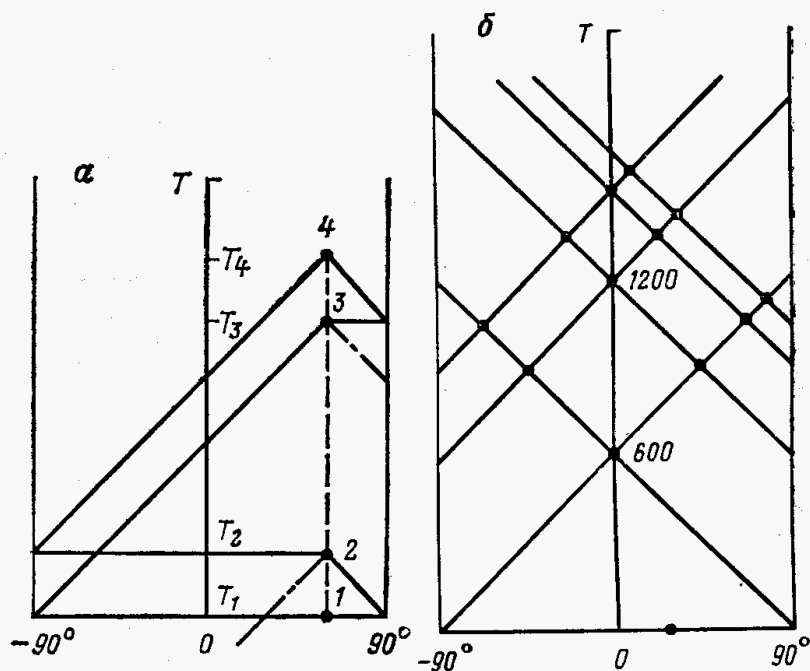


Рис. 56. Схема пересечения Д-волн.

1—4 — землетрясения

новые сильные землетрясения. Вопрос о том, где именно произойдут эти землетрясения, не рассматривался.

Теперь же возникает предположение, что Д-волна, порожденная землетрясением на широте φ , через $(90 \pm \varphi) \cdot 0,15$ лет вызовет новое сильное землетрясение на той же широте φ .

Можно предложить следующее объяснение этому явлению. Пусть на широте φ в момент T_1 возникло землетрясение 1. Пусть Д-волны, возникшие в результате этого землетрясения, дойдя до широты φ , вызвали два землетрясения в моменты $T_2 = T_1 + (90 - \varphi)/0,15$ и $T_3 = T_1 + (90 + \varphi)/0,15$ (2 и 3). Тогда Д-волны от землетрясений 2 и 3 пересекутся также на широте φ (рис. 56) в момент $T_4 = T_1 + 1200$.

Итак, землетрясение послужило началом процесса, в котором на широте φ произошли четыре землетрясения. Для реализации этого процесса необходимы два условия: 1) в момент T_2 на широту φ должна была прийти Д-волна северного направления; 2) в момент T_2 на широту φ должна была прийти Д-волна южного направления.

Рассмотрим дальнейшее развитие процесса, т. е. землетрясение как начало нового цикла, который должен состоять из четырех землетрясений на широте φ . Ясно, что для реализации этого цикла уже нет необходимости ставить два дополнительных условия, ибо одно из них выполняется автоматически: вторым землетрясением этой новой четверки является землетрясение 4 и для него имеются обе необходимые Д-волны, встре-

чающиеся на широте φ (одна из этих Д-волн порождена землетрясением 3, другая — 2). Таким образом, на втором и на всех последующих циклах для поддержания процесса генерации землетрясений на фиксированной широте φ необходимо в момент $T = T' + (90 + \varphi)/0,15$ наличие Д-волны на широте φ , идущей в южном направлении (T' — момент первого землетрясения из рассматриваемой четверки). Иначе говоря, для поддержания процесса требуется периодическая подкачка в виде Д-волны. Как может возникнуть такой периодический источник Д-волн? Один из ответов напрашивается сам собой: процесс, аналогичный описанному, но происходящий на другой широте, будет периодическим источником Д-волн. Как нетрудно убедиться, длительность цикла 1200 лет не зависит от φ , хотя интервал времени между землетрясениями внутри четверки изменяется с широтой φ .

Прежде чем приступить к рассмотрению фактических данных в свете высказанных соображений, отметим одно важное следствие: если с данной широтой связан процесс генерации Д-волн и землетрясений, то набор таких широт должен быть дискретным. В противном случае Д-волны покрыли бы сплошь все пространство, что противоречит их основному свойству — дискретности во времени и в пространстве.

Из описанного выше механизма периодической генерации четверок землетрясений следует также, что дискретные широты, на которых происходят землетрясения, не независимы между собой.

Итак, мы совершаем очередное движение от анализа первичных данных к анализу модели. Анализ каталогов подсказывает гипотезу о дискретном характере распределения эпицентров землетрясений по широте. Попытаемся обнаружить это свойство дискретности в самой модели.

Рассмотрим схему, приведенную на рис. 56, б. Пусть в момент T_0 в произвольном месте Земли произошло сильное землетрясение. Согласно гипотезе, оно вызовет на полюсах две Д-волны, которые, двигаясь навстречу друг другу, встретятся на экваторе через 600 лет. С вероятностью P_0 на экваторе произойдет сильное землетрясение. Это вызовет новую пару Д-волн, которые через 600 лет также встретятся на экваторе; однако до этого, в момент $(T_0 + 900)$ лет, новая пара встретится с первой парой Д-волн на широте 45° . Тем самым (с вероятностью P_1) может произойти новое сильное землетрясение на этой широте, которое, в свою очередь, породит пару Д-волн. На следующем шаге этого процесса произойдет встреча Д-волн на широтах $22,5$ и $67,5^\circ$. Дальнейшее развитие процесса очевидно: к n шагу встреча Д-волн произойдет на широтах $(90/2^n) \cdot i$. Будем называть их Д-широтами. Шаг n , на котором данная Д-широта впервые вовлекается в описанный процесс, называется порядком Д-широты. Соответственно экватор есть Д-широта 0-го порядка, широты $\pm 45^\circ$ есть широты 1-го порядка и т. д.

Неограниченному развитию этого процесса препятствуют две причины: 1) с каждым шагом вероятность возникновения сильного землетрясения падает; 2) каждое сильное землетрясение «разряжает» область размером в сотни километров, в связи с чем возникновение сильных землетрясений в одном регионе на близких широтах становится невозможным.

Для широты 4-го порядка ($n=4$) расстояние между ближайшими Д-широтами равно $5,625^\circ$ (~ 600 км) и поэтому можно предположить, что области сбора энергии землетрясений, происшедших на соседних Д-широтах, не перекрываются. Для $n=5$ такое положение будет скорее исключением.

Таким образом, из гипотезы Д-волн следует, что эпицентры сильнейших землетрясений могут лежать лишь на дискретных широтах $(90/2^n) \cdot i$ ($i=0, 1, 2, \dots, 2^n - 1$), причем n не превышает пяти.

В первой работе, посвященной этому вопросу [13], было принято $n=4$. Для проверки этого утверждения выбраны 26 сильнейших землетрясений мира при следующих ограничениях: интервал широт от -40 до 40° , порог магнитуд $M_0=8,4$ для Южного полушария, а для Северного полушария $M_0=8,6$ и $8,4$ в интервале широт $0 \div 20^\circ$ и $20 \div 40^\circ$ соответственно. Из этих 26 землетрясений 19 лежат не далее 1° от ближайшей Д-широты порядка $n \leq 4$. Вероятность такого события в предположении равномерного распределения эпицентров по широте менее 0,005. При формировании выборки из 26 землетрясений были использованы 6 свободных параметров (три границы регионов и три порога магнитуд), что существенно снижает значимость полученного результата. Для столь важного утверждения о дискретности распределения эпицентров землетрясений необходимы более надежные доказательства.

Что может служить причиной «размывания» дискретного распределения эпицентров по широте? В первую очередь, ошибки при определении координат эпицентров и магнитуд. В настоящее время не видно возможностей уточнения координат землетрясений XX в. А вот уточнение магнитуд представляется возможным благодаря работам Х. Канамори, предложившего новую шкалу магнитуд M_w [50].

Основной недостаток наиболее употребительной магнитуды M_s состоит в том, что при $M_s \geq 8,0$ кривая зависимости M_s от сейсмического момента землетрясения сильно выполаживается.

В результате шкала M_s в этом интервале магнитуд (при наличии ошибок в определении M_s) слабо отражает увеличение энергии землетрясения. Новая магнитуда M_w не имеет этого недостатка и позволяет более правильно упорядочить сильнейшие землетрясения по энергии.

В первом каталоге Х. Канамори [50] с величинами M_w имелось 39 землетрясений, из них 10 с $M_w \geq 8,5$. Из этих десяти сильнейших землетрясений мира девять лежат на Д-широтах с $n \leq 4$ (табл. 20). Следующий опубликованный каталог К. Абе

Сильнейшие землетрясения мира по Х. Канамори [50]

Год	φ, градус	M	Год	φ, градус	M
1960	39,5	9,5	1965	51,3	8,7
1964	61,1	9,2	1950	28,5	8,6
1957	51,3	9,1	1963	44,8	8,5
1952	52,8	9,0	1922	-28,5	8,5
1906	1,0	8,8	1938	-5,3	8,5

и Х. Канамори с величинами M_w охватывал 1953—1977 гг. Естественно, что полнота, точность определения координат и величины M_w в этом каталоге были выше, чем в предыдущем, охватывавшем весь XX в. В последнем каталоге 17 землетрясений имеют $M_w \geq 8,0$ (табл. 21), причем 14 из них лежат на Д-широтах с $n \leq 4$ (с ошибкой менее 1°). Напомним, что при ширине полосы в 2° площадь попадания на Д-широту составляет 0,36 от площади Земли.

Для проверки гипотезы о приуроченности сильнейших землетрясений к Д-широтам отбирались те, магнитуда которых превышала некоторый порог — один для всех регионов Земли. Такой подход является несколько прямолинейным, поскольку для различных регионов Земли даже в пределах сейсмически активных областей характерны землетрясения различной магнитуды. Вывод из гипотезы Д-волн о дискретности распределения эпицентров сильнейших землетрясений можно сформулировать несколько иначе, а именно как утверждение, что в полосе, прилегающей к данной Д-широте, сильнейшее землетрясение происходит на самой Д-широте. В отличие от первоначальной формулировки гипотезы данная формулировка не содержит свободного параметра — порога магнитуд — и при той же статистике будет более надежной.

Таблица 21

Сильнейшие землетрясения 1953—1977 гг.

Год	φ, градус	M_w	Год	φ, градус	M_w
1953	51,3	9,1	1966	-11,9	8,0
1957	45,2	8,1	1968	40,9*	8,2
1958	44,4	8,3	1969	43,4*	8,2
1959	53,2*	8,2	1971	-5,5	8,0
1960	-39,5	9,5	1974	-12,2	8,1
1963	44,9	8,5	1975	-6,6	8,0
1964	61,1	9,2	1976	6,3	8,1
1965	51,3	8,7	1977	-11,1	8,3
1966	-10,7	8,1			

* Эпицентры, не лежащие на Д-широтах.

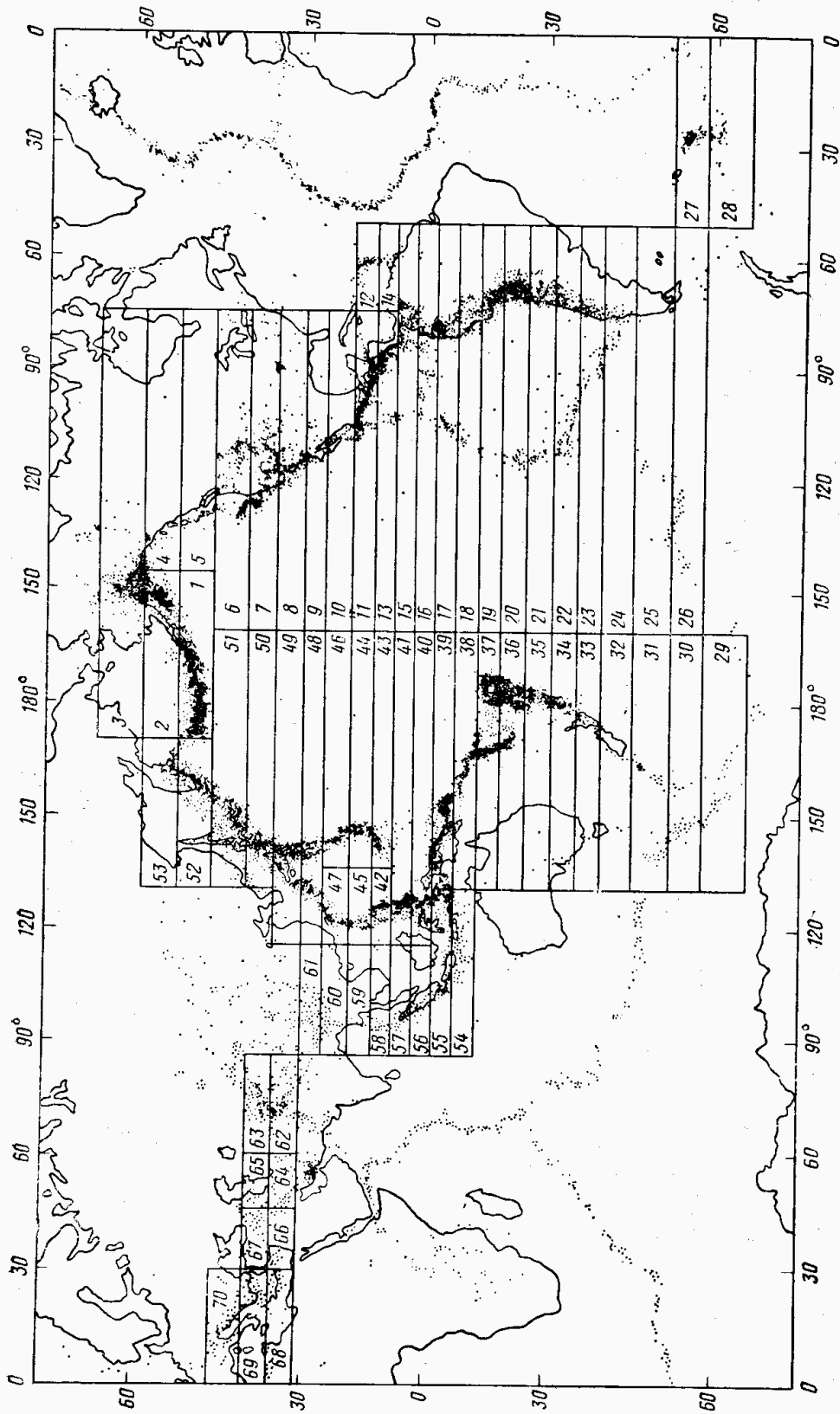


Рис. 57. Схема разделения сейсмических областей мира на регионы

Для проверки этого утверждения поверхность Земли была разделена на широтные полосы, ось каждой полосы — одна из Д-широт, ширина всех полос одинакова и равна $5,625^\circ$. Каждая из таких полос пересекает один или несколько сейсмически активных районов Земли. Поскольку рассматриваемое утверждение справедливо в первую очередь для сильнейших — по абсолютной шкале — землетрясений, наиболее благоприятно для исследования Тихоокеаническое сейсмическое кольцо (ТСК): во многих местах этого кольца зарегистрированы землетрясения с $M_s \geq 8,0$, а землетрясения с $M_s \geq 7,0$ почти всюду.

Для анализа использовался каталог землетрясений USCGS за 1897—1977 гг. Все ТСК покрывают 23 широтные полосы, соответствующие 23 Д-широтам с $n \leq 4$.

Каждая широтная полоса пересекает ТСК два раза или более. Эти районы отстоят один от другого на тысячи километров. Можно полагать, что накопление тектонической энергии в этих районах происходит независимо и поэтому в каждом из них наиболее сильное (максимальное) землетрясение должно в соответствии с нашим предположением происходить на Д-широте. Таких районов на ТСК оказалось 53 (рис. 57), максимальные землетрясения для которых приведены в табл. 22. В одном из районов нет землетрясений с $M_s \geq 7,0$, и он исключен из рассмотрения. В 32 районах из рассматриваемых 52 максимальные землетрясения лежат не далее чем в 1° от Д-широты (в этом случае будем в дальнейшем говорить «лежат на Д-широте»). Это позволяет с вероятностью больше 0,995 отвергнуть гипотезу о равномерном распределении эпицентров максимальных землетрясений в полосе шириной $5,625^\circ$. По существу, это единственная гипотеза, которую необходимо отвергнуть: любая гипотеза о неравномерности распределения эпицентров максимальных землетрясений в полосе шириной $5,625^\circ$ указывает на периодичность распределения эпицентров землетрясений с шагом $5,625$, т. е. поддерживает гипотезу Д-волн.

Если рассмотреть только районы, в которых имеются землетрясения с $M_s \geq 8,0$ (а их 36), то в 23 из них максимальное землетрясение лежит на Д-широте. В обоих случаях доля районов, в которых максимальные землетрясения лежат на Д-широтах, равна 0,63.

Выше мы отмечали, что использование каталогов, составленных Х. Канамори, позволило более наглядно продемонстрировать приуроченность сильнейших землетрясений мира к Д-широтам. По этой причине мы повторим предыдущий анализ, внося в каталог USCGS изменения в соответствии с работой К. Абе и Х. Канамори. Эти изменения касаются магнитуд землетрясений периода 1897—1903 гг. Среди 52 рассматриваемых районов имеется семь, в которых максимальные землетрясения произошли в этот период. Все они имеют $M_s \geq 8,0$ и для всех были пересмотрены магнитуды. В трех районах это

Сильнейшие землетрясения в широтных районах

Номер района	Год	φ_1 , градус	φ , градус	λ , градус	M_S	$M_S \geq 7$	$M_S \geq 8$	M_0 [46]	M_S [50]	$M_S \geq 8$ [50]
1	1929	50,6	51,0	-170,0	8,6	*	*	*		
2	1938	56,25	55,5	-158,0	8,7	*	*	*		
3	1899	61,9	60,0	-140,0	8,6	*	*	*		
4	1949	56,25	53,75	-133,25	8,1	—	—	—	8,2	*
5	1946	50,6	49,9	-125,3	7,3	*	*	—		
6	1959	45,0	44,8	-111,1	7,1	*	*	—		
7	1906	39,1	38,0	-123,0	8,3	—	—	—	7,7	
8	1915	33,75	32,0	-115,0	7,1	—	—	—		
9	1907	28,1	28,0	-112,0	7,5	*	*	—		
10	1900	22,5	20,0	-105,0	8,3	—	—	—	7,9	
11	1899	16,9	17,0	-98,0	8,4	*	*	—	7,9	*
12	1946	16,9	19,2	-69,0	8,1	—	—	—		
13	1942	11,25	14,0	-91,0	8,3	—	—	—		
14	1900	11,25	11,0	-66,0	8,4	*	*	—	8,1	*
15	1904	5,6	7,0	-79,0	7,9	—	—	—		
16	1906	0,0	1,0	-81,5	8,9	*	*	—		
17	1953	5,6	-3,4	-80,6	7,75	—	—	—		
18	1940	11,25	-10,5	-77,0	8,4	*	*	*		
19	1942	16,9	-15,0	-76,0	8,6	—	—	—		
20	1950	22,5	-23,5	-67,5	8,3	*	*	—		
21	1922	28,1	-28,5	-70,0	8,4	*	*	*		
22	1906	33,75	-33,0	-72,0	8,6	*	*	*		
23	1960	39,4	-39,5	-74,5	8,5	*	*	*		
24	1927	45,0	-44,5	-73,0	7,1	*	*	*		
25	—	50,6	—	—	—	—	—	—		
26	1949	56,25	-54,0	-71,0	7,75	—	—	—		
27	1929	56,25	-54,0	-29,5	8,3	—	—	—		
28	1973	61,9	-60,82	-21,5	7,5	*	—	—		
29	1945	61,9	-62,0	153,0	7,1	*	*	—		
30	1924	56,25	-56,0	157,5	8,3	*	*	—		
31	1943	50,6	-53,0	159,0	7,9	—	—	—		
32	1945	45,0	-46,5	165,5	7,2	—	—	—		
33	1931	39,4	-39,5	177,0	7,9	*	*	—		
34	1949	33,75	-33,5	-178,0	7,2	*	*	—		
35	1917	28,1	-29,0	-177,0	8,6	*	*	—		
36	1901	22,5	-22,0	170,0	8,4	*	*	—		
37	1917	16,9	-15,5	-173,0	8,7	—	—	—		
38	1934	11,25	-11,75	166,5	8,1	*	*	*		
39	1938	5,6	-5,25	130,5	8,6	*	*	*		
40	1939	0,0	0,0	123,0	8,6	*	*	*		
41	1897	5,6	6,0	122,0	8,7	*	*	*	8,1	*
42	1931	11,25	10,5	122,0	8,3	*	*	—		
43	1931	11,25	11,0	144,75	7,2	*	*	—		
44	1902	16,9	18,0	146,0	8,1	—	—	—	7,9	
45	1934	16,9	17,5	119,0	7,9	*	*	—		
46	1914	22,5	22,0	143,0	8,7	*	*	—		
47	1920	22,5	23,5	122,0	8,3	*	*	—		
48	1911	28,1	29,0	129,0	8,7	*	*	—		
49	1946	33,75	32,5	134,5	8,4	—	*	—		

Номер района	Год	φ_1 , градус	φ , градус	λ , градус	M_s	$M_s \geq 7$	$M_s \geq 8$	M_{ω} [46]	M_s [50]	$M_s \geq 8$ [50]
50	1933	39,4	39,25	144,5	8,9	*	*	*		
51	1958	45,0	44,4	148,8	8,7	*	*	*		
52	1952	50,6	52,75	159,5	8,4	—	—	—		
53	1923	56,25	54,0	161,0	8,4	—	—	—		
54	1977	11,25	-11,1	118,5	8,0	*	*	—		
55	1903	5,6	8,0	106,0	8,1	—	—	—		
56	1935	0,0	0,0	98,25	8,1	*	*		7,9	
57	1936	5,6	5,0	95,0	7,3	*				
58	1941	11,25	12,5	92,5	8,7	—	—			
59	1930	16,9	17,0	96,5	7,3	*				
60	1912	22,5	21,0	97,0	7,9	—				
61	1950	28,1	28,5	96,5	8,7	*	*	*		
62	1905	33,75	33,0	76,0	8,6	*	*			
63	1902	39,4	40,0	77,0	8,6	*	*			
64	1978	33,75	33,2	57,3	7,7	*				
65	1946	39,4	39,75	54,5	7,5	*				
66	1915	33,75	33,5	38,0	7,0	*				
67	1939	39,4	39,5	38,5	7,9	*				
68	1926	33,75	36,5	27,5	8,3	—	—			
69	1956	39,4	36,7	25,8	7,8	—				
70	1940	45,0	45,75	26,5	7,4	*				

Примечания. Знаком «*» отмечены районы, в которых землетрясения лежат на Д-широтах с $n \leq 4$. Знаком «—» отмечены районы, в которых максимальные землетрясения не лежат на Д-широтах с $n \leq 4$.

не повлияло на выбор максимального землетрясения (районы 10, 14, 44). В четырех районах уменьшение магнитуды привело к смене максимального землетрясения: это районы 3, 11, 36, 41. Параметры новых землетрясений таковы: район 3 — $\varphi = 61,1^\circ$, $\lambda = 147^\circ$, $M_s = 8,5$, 1964 г.; район 11 — $\varphi = -17^\circ$, $\lambda = 100^\circ$, $M_s = 8,3$, 1907 г.; район 36 — $\varphi = 20^\circ$, $\lambda = 168^\circ$, $M_s = 8,3$, 1920 г.; район 41 — $\varphi = 6,5^\circ$, $\lambda = 126^\circ$, $M_s = 8,3$, 1924 г. Три из этих четырех землетрясений лежат на Д-широтах.

К этим изменениям добавим изменение магнитуды Калифорнийского землетрясения 1906 г. по данным Т. Ханкса и Х. Канамори (1975 г.) ($M_s = 7,7$) и, наконец, изменение широты Тонанкайского землетрясения 1944 г. согласно Х. Канамори (1972 г.) ($33,13^\circ$ вместо $32,5^\circ$, как в каталоге USCGS).

Итог всех этих изменений: для землетрясений с $M_s \geq 8,0$ в 24 из 33 районов (0,74) максимальные лежат на Д-широтах. Необходимо подчеркнуть, что этот результат не следует расценивать как факт, подтверждающий дискретное распределение эпицентров максимальных землетрясений. С этой точки зрения он довольно уязвим, ибо произведенные в каталоге

USCGS изменения можно трактовать как подгонку результатов. Однако, как показано выше приуроченность максимальных землетрясений к Д-широтам доказывается анализом неизменного каталога USCGS. Проведенное нами изменение каталога в соответствии с работами одного лишь автора — Х. Канамори — показывает, что проверяемое предположение является весьма наглядным.

Рассмотрим также расположение эпицентров максимальных землетрясений в районах пересечения выделенных нами широтных полос с другим сейсмическим поясом — Альпийско-Гималайско-Зондским (см. рис. 57). В табл. 22 имеются данные о максимальных землетрясениях в этих районах. Отношение числа районов, в которых максимальные землетрясения лежат на Д-широтах, к общему числу районов равно $11/16 = 0,69$. Для районов, где имеются землетрясения с $M_s \geq 8$, это отношение равно $5/8$, а с учетом изменений магнитуд, согласно Х. Канамори, это отношение составляет $5/7$. Таким образом, и здесь максимальные землетрясения приурочены к Д-широтам. Общая статистика для всех регионов такова: 37 из 40 землетрясений с $M_s \geq 8,0$ попадают в Д-широты с $n \leq 5$.

Приступим теперь к анализу «ошибок» — случаев, когда землетрясения, будучи сильнейшими в своих районах, не лежат на Д-широтах. Поскольку наиболее яркий результат был получен для землетрясений с $M_s \geq 8$ (каталог USCGS с исправлениями Х. Канамори), то мы проанализируем ошибки именно этого варианта.

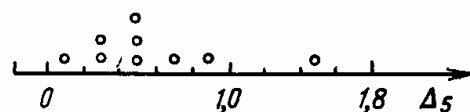
Гипотеза Д-волн утверждает, что если на некоторой широте произошло сильное землетрясение, то это означает, что здесь встретились две Д-волны. Из глобального характера Д-волн и их симметричности относительно экватора следует, что имеются условия для возникновения сильного землетрясения на этой же широте или на широте, симметричной относительно экватора.

Если не различать полос, лежащих в Северном и Южном полушариях на одинаковых широтах, то всего имеется 11 Д-широт с $n \leq 4$ между экватором и широтой 62° (т. е. в области, где зарегистрированы землетрясения с магнитудной $M_s \geq 8,0$).

Ниже приводятся широты максимальных землетрясений девяти районов ТСК, где эти землетрясения не попали на Д-широты с $n \leq 4$: $-54,0^\circ$; $-54,0^\circ$; $53,75^\circ$; $52,75^\circ$; $-15,5^\circ$; $-15,0^\circ$; $14,0^\circ$; $19,2^\circ$; $-20,0^\circ$.

Видно, что все эти землетрясения сосредоточены в трех широтных полосах из 11 возможных. Вероятность случайного выпадения такого события в предположении равномерного распределения эпицентров по широте равна 0,01. В то же время такое неравномерное распределение хорошо согласуется с гипотезой Д-волн. Более того, распределение эпицентров этих девяти землетрясений по широте указывает на их приурочен-

Рис. 58. Расстояние эпицентров землетрясений от Д-широты 5-го порядка



ность к Д-широтам 5-го порядка (рис. 58), что согласуется с выводами, сделанными выше.

Таким образом, использование каталогов Х. Канамори позволило показать, что все максимальные землетрясения Тихоокеанского сейсмического кольца с $M_s \geq 8,0$ (за исключением одного) лежат на Д-широтах с $n \leq 5$.

Полученный результат представляется весьма нетривиальным. Проследим еще раз путь, который привел к этому результату. Прежде всего была поставлена задача — найти внутренние закономерности сейсмического процесса, т. е. закономерности, содержащиеся в самой сейсмической картине, в пространственно-энергетически-временном распределении сейсмических событий. Исходной гипотезой было предположение о существовании глобальных возмущений, являющихся спусковым механизмом сильных землетрясений. Дальнейшее развитие модели шло логическим путем. Вначале было определено, что волны должны быть концентрическими. Затем их источник был привязан к полюсу, как к единственной особенности на вращающемся шаре. После этого естественно было предположить симметричность волн и, как следствие, их пересечение в определенных зонах. С этими особенностями можно было связать самые сильные землетрясения. Связь Д-волн с полюсами диктовала связь с неравномерностью вращения Земли. Наконец, изменение скорости вращения Земли в результате перераспределения масс при сильных землетрясениях замыкает сейсмический процесс и превращает его в автоколебательный. В таком виде модель содержит в себе все необходимое для получения вывода о дискретном распределении эпицентров сильнейших землетрясений по широте. Заметим, что в ходе построения модели были использованы лишь два эмпирических факта: вращение Земли вокруг своей оси и изменение скорости вращения Земли при перераспределении масс. Для построения модели вовсе не требовались каталоги землетрясений. Эти каталоги потребовались для подкрепления различных промежуточных результатов, т. е. единственно для того, чтобы поддерживать веру в эту странную модель. В этом и заключается принципиальное отличие анализа эмпирических данных и анализа моделей. Как мы старались показать в трех предыдущих частях книги, при анализе эмпирических данных решающую роль играет учет априорной информации и неформальный подход состоит в том, чтобы осознать ее и найти формы ее использования. При анализе моделей, гипотез и теорий неформальный подход состоит в том, чтобы вместо всей априорной информации суметь провести формальный анализ модели.

§ 2. СЕЙСМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ ГИПОТЕЗЫ Д-ВОЛН

Выше была определена глобальная система Д-волн. По определению, каждое землетрясение с $M_s \geq 8$ порождено встречей двух Д-волн, идущих во встречном направлении. Тем самым каждое такое землетрясение фиксирует положение двух глобальных Д-волн. Поскольку нам известна скорость движения Д-волн ($0,15^\circ$ в год), то мы можем рассчитать положение (т.е. широту φ) каждой из этих двух волн в любой момент времени. Тем самым мы можем зафиксировать положение всех Д-волн в фиксированный момент времени T_0 (например, на 1.1.1900 г.). Множество глобальных Д-волн задается множеством землетрясений XX в. с $M_s \geq 8$. При этом необходимо учесть, что одна Д-волна может на своем пути вызвать несколько землетрясений с $M_s \geq 8,0$. Однако обнаружить этот факт не всегда легко, так как зафиксировать Д-волну можно лишь с определенной точностью, которая зависит от точности определения координат (а точнее, широты φ) эпицентра землетрясения. Поэтому если положение двух Д-волн, вычисленное на момент T_0 , отличается на несколько десятых долей градуса, то трудно сказать, имеем ли мы дело с одной Д-волной, спровоцировавшей на пути два землетрясения с $M_s \geq 8,0$, эпицентры которых определены со значительной погрешностью, или это действительно две Д-волны. Ситуация неопределенности усугубляется тем, что точность определения координат эпицентров не всегда известна, значительно меняется со временем и зависит от положения эпицентра землетрясения относительно сети сейсмостанций.

В ряде случаев объединение двух или трех Д-волн было вполне естественным, в некоторых случаях было принято волевое решение. В соответствии с имеющимися в каталогах землетрясений данными было принято, что разница в положении Д-волн $0,3-0,4^\circ$ в момент T_0 является следствием ошибок в определении координат эпицентра, и такие Д-волны объединялись. В случае, когда расстояние между Д-волнами составляло $0,8-1,0^\circ$ и более, считалось, что это действительно разные Д-волны. Трудные решения приходилось принимать в двух ситуациях: 1) расстояние между Д-волнами составляло $0,5-0,7^\circ$, 2) имелись три близкие Д-волны с интервалом между соседними $0,3-0,5^\circ$. Каждую пару соседей можно было бы объединить, но оставался третий сосед и не ясно было, как с ним быть. При объединении всех трех Д-волн в одну оказывалось, что объединена пара Д-волн с расстоянием примерно в 1° .

Тем не менее к 1978 г. была зафиксирована глобальная система волн [13]. Положение всех Д-волн на момент $T_0 = 1900$ было определено графическим путем, поскольку не было необходимости в особой точности — ведь точность определения широты эпицентров составляла несколько десятых долей градуса.

Кроме фиксации системы глобальных волн для прогноза времени землетрясений понадобилась еще одна гипотеза — гипотеза Д-центров. Суть этой гипотезы в следующем. Существуют регионы, для которых можно ввести понятие Д-центра, обладающего следующими свойствами: 1) в нем происходит сильнейшее землетрясение региона, 2) все землетрясения региона с $M \geq M_{\max} - C$ (где C обычно равно 1) могут происходить только тогда, когда в Д-центр региона приходит одна из глобальных Д-волн. Регион, обладающий Д-центром, называется Д-регионом. Для проверки этой гипотезы были выделены Д-регионы. Поиск Д-регионов велся путем перебора. Выбиралось сильнейшее землетрясение в каком-либо районе ($M = M_{\max}$). Проверялось, не лежит ли оно на какой-либо из глобальных Д-волн. Если это было землетрясение с $M_s \geq 8,0$, то оно могло или точно лежать на Д-волне (если Д-волна определялась лишь одним этим землетрясением), или лежать от ближайшей Д-волны на расстоянии не более нескольких десятых долей градуса. Если это было землетрясение с $M_s < 8,0$, то расстояние до ближайшей Д-волны произвольно. На рис. 59 показаны все три случая положения эпицентра на плоскости (φ, T) относительно Д-волны. Во всех случаях, когда землетрясение не лежит на Д-волне, оно перемещается на Д-волну путем изменения координаты φ , т. е. широты эпицентра φ исправлялась так, чтобы в момент землетрясения T ближайшая Д-волна как раз оказалась в эпицентре. Так фиксировалась широта Д-центра φ_c .

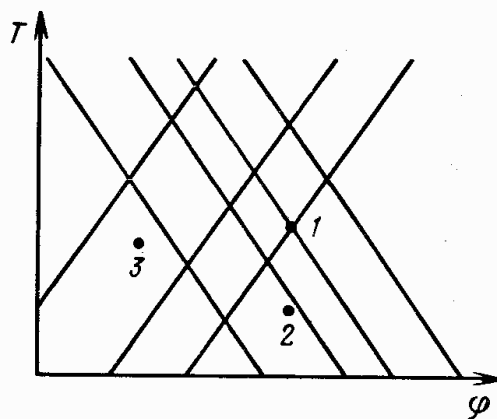


Рис. 59. Различные варианты взаимного положения эпицентров и Д-волн

Затем Д-центр окружался прямоугольной окрестностью (с границами по параллелям и меридианам). Фиксировался порог землетрясений по магнитуде $M_0 = M_{\max} - C$. Выбиралась по каталогу все землетрясения с $M \geq M_0$ и с эпицентрами, лежащими внутри определенной выше окрестности. Для этой выборки землетрясений проверялось свойство 2 из гипотезы о Д-центре: землетрясения с $M \geq M_0$ происходят лишь тогда, когда в Д-центр приходит глобальная Д-волна.

Поскольку широта Д-центра φ_c задана, а система глобальных Д-волн зафиксирована, то можно рассчитать моменты прихода всех Д-волн на широту φ_c . Если момент T_i возникновения какого-нибудь землетрясения из зафиксированной выборки отличался от момента прихода какой-либо Д-волны в Д-центр θ_j не более чем на 0,5 года, считалось, что свойство 2 удовлетворено для данного землетрясения. Чтобы свойство 2 считалось

Таблица 23

Прогноз землетрясений по Д. регионам

Номер региона	Регион	φ, градус	λ, градус	φ _с , градус	M ₀	Годы					
						1978	1979	1980	1981	1982	1983
1	Чили I	38 — 45		38,05	7,0						
2	Чили II	35 — 38		35,2	7,25						
3	Япония II	38,5 — 40,5		39,2	7,2						
4	КНР	31 — 43	100 — 105	36,0	7,1						
5	Новая Зеландия	39,5 — 42,0		39,45	7,1						
6	Северная Калифорния	35,5 — 38,5		37,8	6,0						
7	Центральная Калифорния	34,0 — 35,5		35,0	6,0						
8	Средняя Азия			40,15	6,5						
9	Тянь-Шань — Алтай	42,5 — 44,0	76 — 85	43,5	6,5						
10	Италия I	< 44,0		39,15	6,0						
11	Анатолия	35 — 42	27 — 44	39,1	7,2						
12	Карпаты			45,8	6,5						
13	Италия II			46,0	5,8						
14	Япония III	> 44,0		42,35	7,5						
15	Курильские острова — Япония	40,8 — 43,5	138 — 148	44,3	7,4						
16	Япония IIa	38,0 — 38,6	140 — 143	38,65	6,5						
17	Япония IIb	38,7 — 39,5	140 — 143	39,05	6,5						

Примечание. Линия означает интервалы "тревоги", точки — землетрясения.

выполненным для региона, требовалось, чтобы выборка была не слишком мала, а свойство 2 выполнялось для подавляющего большинства землетрясений из выборки (в среднем в выборке оказалось 6—7 землетрясений).

Если при данном выборе окрестности и порога M_0 не удавалось удовлетворить перечисленным условиям, уменьшалась или сдвигалась окрестность или повышался порог M_0 . Если никакие изменения не приводили к успеху, выбиралось самое сильное землетрясение из другого района и процедура построения начиналась сначала. Таким образом удалось выделить 17 регионов (табл. 23), расположенных в различных частях мира и обладающих высокой сейсмичностью.

В табл. 23 отмечены интервалы «тревоги», т. е. интервалы времени, когда возможны сильные землетрясения. Для некоторых регионов не указаны границы регионов по долготе (на некоторых участках Тихоокеанского кольца и в Италии). В этих случаях в регион включается вся ширина сейсмического пояса в данной географической области.

Итак, в Д-регионах моменты прихода глобальных Д-волн в Д-центр есть моменты возможного, но необязательного возникновения сильных (в масштабах региона) землетрясений; в другое время сильные землетрясения здесь невозможны. Вследствие всевозможных погрешностей сформулированный прогноз должен быть ослаблен.

Вместо точного совпадения T_i и θ_j допускается их расхождение на величину не больше 0,5 года. Утверждение, что вне интервалов тревоги ($\theta_j \pm 0,5$ года) невозможно возникновение сильных землетрясений, заменяется более слабым утверждением, что вероятность возникновения таких землетрясений не превышает 0,2.

В формулировку прогноза землетрясений в Д-регионе, кроме интервалов тревоги, входят еще две характеристики: порог магнитуд M_0 и граница региона. M_0 определялось естественным образом — по магнитуде самого слабого землетрясения, входившего в выборку, по которой был построен Д-регион. Естественно, что ошибки в определении магнитуд внесли свои ошибки в определение характеристик Д-региона и будут вносить ошибки в прогноз на будущее.

В 1977 г. была определена система Д-волн и выделено 17 Д-регионов (определены их границы, M_0 и широта Д-центров). На этом основании был дан прогноз по этим 17 регионам: указаны интервалы времени ($\theta_j \pm 0,5$) года, в которые возможны землетрясения с $M \geq M_0$. Относительно M_0 была сделана следующая оговорка. Поскольку Д-регионы строились по каталогам Дуды (до 1960 г.) и Бюллетеням сейсмической станции Обнинск (после 1960 г.), где в основном была использована магнитуда M_L , то считалось, что землетрясение превосходит по силе порог M_0 , если $M_0 \geq M_s$ или $M_0 \leq M_L$ [15].

§ 3. СВЯЗЬ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ С Д-ШИРОТАМИ

Давно установлена связь полезных ископаемых с дизъюнктивными узлами. Эта связь легко объяснима для рудных месторождений, имеющих глубинное происхождение: пересечение разломов — наиболее благоприятное место для поступления мантийного вещества к поверхности. Для месторождений нефти и газа, а также для рудных месторождений, глубинное происхождение которых признается не всеми исследователями, связь с зонами пересечения глубинных разломов объясняется образованием мощных природных резервуаров в осадочных породах в результате интенсивного прогибания земной коры, возникновением экранов, перегибов, зон выклинивания, чему особенно благоприятствуют движения блоков фундамента под осадочной толщей, наличием каналов и источников энергии для миграции флюидов и образования залежей полезных ископаемых. При этом наиболее реальным процессом, выделяющим такую энергию и открывающим каналы миграции, является сейсмотектонический процесс. В связи с этим именно сейсмогенные узлы — наиболее благоприятные места для образования месторождений полезных ископаемых.

Связь месторождений полезных ископаемых с сейсмогенными морфоструктурными узлами и приуроченность этих узлов к Д-широтам приводят к гипотезе о приуроченности месторождений полезных ископаемых к Д-широтам. Проверим эту гипотезу, сопоставив положение крупнейших месторождений полезных ископаемых с Д-широтами. Заметим, что Д-широты с $n \leq 4$ будем обозначать Д₁—Д₄-широтами, а Д-широты с $n = 5$ — Д₅-широтами. Положение месторождений (или районов нефтегазонакопления) определялось положением их центров, т. е. средней широтой. Мы считали, что центр лежит на Д₁—Д₄-широтах (Д₅-широте), если он отстоит от нее более чем на 1° (0,5°). Таким образом, зона Д₁—Д₄-широт занимает 0,36, а зона Д₅-широт — 0,18 площади Земли. Расстояние до ближайшей из Д₁—Д₄-широт будем обозначать Δ₄.

Всего на земном шаре выделяется 21 бассейн нефте- и газонакоплений, в состав которых входит от 1 до 8 гигантских месторождений (табл. 24). В 11 бассейнах самые крупные месторождения лежат в зоне Д₁—Д₄-широт, в 7 бассейнах в зоне Д₅-широт. Таким образом, в 18 из 21 бассейна гигантских нефте- и газонакоплений самые крупные месторождения лежат на Д-широте 4-го или 5-го порядка. На основании этого гипотеза о независимом расположении крупнейших месторождений в зонах нефтегазонакопления относительно Д-широт должна быть отвергнута с вероятностью больше 0,99.

Учитывая, что протяженность гигантских месторождений за немногими исключениями, менее 1°, можно ожидать, что не только центры месторождений, но и их контуры расположены

Расположение крупнейших месторождений относительно D_1 — D_4 -широт

Месторождение	Бассейн	n	Φ , градус	Δ_4 , градус
Нефтяные месторождения				
Прадхо-Бей	Арктического склона Аляски	1	70,0	2,5
Экофиск	Североморский	2	56,5	0,2
Киркук	Персидского залива	1	35,5	1,7
Марун, Ахваз	То же	8	31,2	2,6
Румейла	"	2	30,4	2,3
Эль-Бурган	"	1	29,0	0,9
Хафджи-Сафания	"	7	28,2	0,1
Гхавар	"	5	25,0	2,5
Мурбан	"	1	23,9	1,4
Хасси-Мессауд	Сахаро-Ливийский	1	31,9	1,9
Серир	"	1	27,6	0,5
Боливар	Маракаибский	1	10,3	0,9
Газовые месторождения				
Бованенковское	Западно-Сибирский	1	70,2	2,7
Уренгойское	"	3	67,0	2,5
Гронинген	Центрально-Европейский	1	53,3	2,7
Оренбургское	Волго-Уральский	1	51,4	0,8
Панхэндл-Хьюгтон	Западный Внутренний, США	1	36,3	2,5
Хасси-Р'Мель	Сахаро-Ливийский	1	32,9	0,9
Канган	Персидского залива	2	28,0	0,1
Месторождения асфальтовых песков				
Атабаска	Западно-Канадский	1	56,7	0,4
Пис-Ривер	"	1	56,2	0,1

в зоне D -широт. Действительно, около 80 % запасов гигантских зарубежных месторождений сосредоточено в пределах D -широт (рис. 60). Иными словами, плотность запасов нефти и газа на D -широтах втрое выше, чем между ними.

Можно показать, что обнаруженная закономерность справедлива не только для гигантских, но и для крупных месторождений. Рассмотрим нефтегазоносные бассейны земного шара,

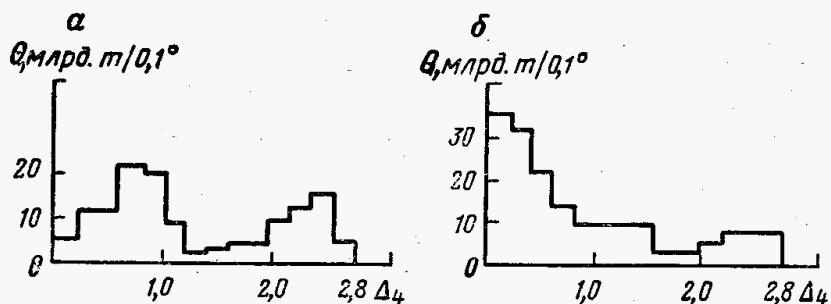


Рис. 60. Распределение плотности запасов нефти и газа Q относительно D -широт:

a — для 18 месторождений с запасами до 30 млрд. т; b — для трех сверхгигантских месторождений с запасами свыше 30 млрд. т

Положение наиболее крупных месторождений нефтегазоносных бассейнов зарубежных стран относительно Д-широт

Бассейн	Месторождение	Ф, градус	Δ, градус
Европа			
Североморский	Экофиск	56,8	0,5
Венский	Цвендорф	48,3	2,3
Паннонский	Альдье	46,7	1,7
Трансильванский	Шарош	46,2	1,2
Аквитанский	Лак	43,1	1,9
Предкарпатско-Балканский	Морени-Гура-Окница	45,0	0,0
Азия			
Джунгарский	Карамай	45,4	0,4
Преднаньшанский	Яэря	40,0	0,6
Цайдамский	Ленху	38,6	0,8
Центрально-Иранский	Сараджех	34,2	0,4
Восточно-Средиземноморский	Кокхав	31,3	2,5
Нижнеиндский	Суи	28,7	0,6
Ассамский	Нахоратъя	27,4	0,7
Сычуанский	Шиюгоу-Дунси	28,7	0,6
Персидского залива	Гхавар	25,0	2,5
Бенгальский	Титас	24,7	2,2
Камбейский	Анклешвар	21,9	0,6
Сараванский	Ампа, Серия	4,6	1,0
Центрально-Суматринский	Минас	0,7	0,7
Северо-Яванский	Джатибуран	6,6	1,0
Африка			
Сахаро-Ливийский	Серир	27,6	0,5
Суэцкого залива	Морган	28,2	0,1
Гвинейского залива	Кабинда	-5,4	0,2
Северная Америка			
Свердруп	Кристоффер-Бей	77,8	0,9
Бофорта	Малик	70,0	2,5
Арктического склона	Прадхо-Бей	70,0	2,5
Залива Кука	Кенай	60,5	1,4
Западно-Канадский	Атабаска	56,0	0,3
Биг-Хорн	Элк-Бесин	45,0	0,0
Паудер-Ривер	Солт-Крик	43,2	1,8
Уинта-Пайсенс	Рейнджли	40,1	0,7
Иллинойский	Олд-Иллинойс	38,5	0,9
Предаппалачский	Болдуин-Солт-Лейк	39,0	0,4
Мичиганский	Лима	40,7	1,3
Парадокс	Грейтер-Анет	37,0	2,4
Сан-Хуан	Бланко	36,9	2,5
Хаф-Мун-Салинс-Кайама	Сан-Ардо	36,5	2,7
Западный Внутренний	Панхэдл-Хьюгтон	36,6	2,8
Грейт-Валли	Мидуэй-Сансет	35,2	1,4
Вентура	Вентура	34,5	0,7
Лос-Анджелос	Уилмингтон	33,8	0,1
Преуошитский	Ред-Оук-Норрис	35,0	1,2
Пермский	Иетс	31,5	2,3
Галф-Кост	Чиконтспек	20,8	1,7

Бассейн	Месторождение	Ф, градус	Δ ₄ , градус
Южная Америка			
Маракаибский	Боливар	10,4	0,9
Ориноковский	Кирикири	10,0	1,3
Верхней и Средней Магдалены	Ла-Сира-Инфантас	6,6	1,0
Гуаякиль-Прогрессо	Ла-Бреа-Паринас	-4,8	0,8
Сержипи-Алагоас	Кармополис	-10,8	0,5
Реконкаво	Агау-Гранде	-12,1	0,8
Австралия			
Дампьер	Норт-Рэнкин	-19,5	2,6
Амадиес	Палм-Валли	-24,0	1,5
Восточно-Австралийский	Гуджелле	-28,0	0,1
Гипсленд	Кингфиш	-38,6	0,8
Таранаки	Мауи	-39,7	0,3

в которых открыто хотя бы одно крупное месторождение (с геологическими запасами не менее 100 или извлекаемыми запасами не менее 50 млн. т нефти или млрд м³ газа). Таких бассейнов во всем мире (без СССР) насчитывается 55 [34]. В каждом бассейне выберем наиболее крупное месторождение (согласно данным из [25]) и определим положение его центра относительно ближайшей Д-широты. Из табл. 25 и рис. 61 видно, что в 44 из 55 НГБ самое крупное месторождение лежит в зоне Д-широт (в 33 бассейнах на Д₁—Д₄-широтах, в 12 бассейнах на Д₅-широте). Вероятность такого распределения месторождений в предположении, что они расположены независимо от Д-широт, равна 0,001.

Обращает на себя внимание, что большая часть месторождений сосредоточена на Д₁—Д₄-широтах, а остальные — на Д₅-широте. Такое распределение полностью повторяет распределение эпицентров сильнейших землетрясений относительно Д-широт (рис. 62). Этим еще раз подчеркивается связь сейсмичности с формированием месторождений нефти и газа.

Факт приуроченности месторождений к Д-широтам представляется установленным: Д-широты были определены априори и месторождения взяты из априорных литературных источников. Какое можно дать объяснение обнаруженной закономерности? Немалую роль в повышенной мобильности дизъюнктивных узлов играют флюиды земной коры и мантии. Следовательно, сейсмическая активность не может не сопровождать весь процесс формирования месторождений флюидогенных полезных ископаемых, связанных с глубинными разломами. Огромная механическая энергия, большое количество газов, периодическое раскрытие и закрытие трещин, а также локализация этих

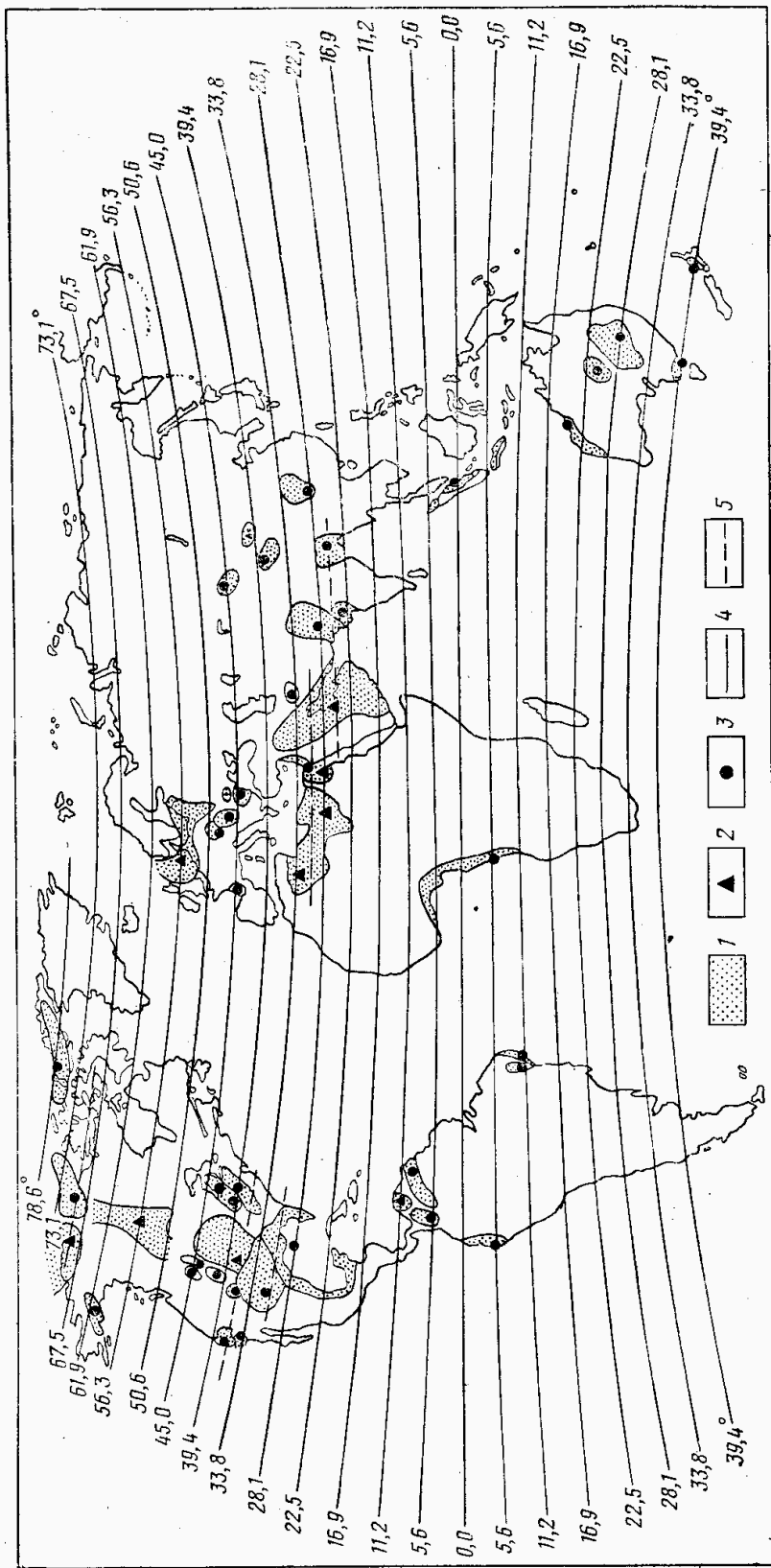


Рис. 61. Размещение наиболее крупных зарубежных месторождений нефти и газа в нефтегазоносных бассейнах.

1 — нефтегазоносные бассейны зарубежных стран, в которых известно хотя бы одно крупное месторождение нефти или газа; наиболее крупные месторождения в нефтегазоносном бассейне: 2 — гигантское, 3 — крупное, 4 — Д-широты с $n \leq 4$; 5 — Д-широты с $n = 5$

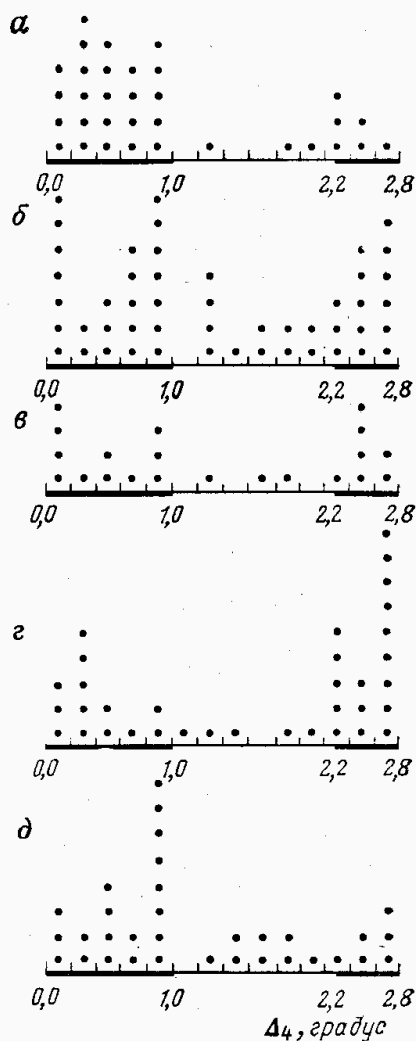
Рис. 62. Распределение расстояний до ближайших D_1 — D_4 -широт от эпицентров максимальных землетрясений (а), от гигантских месторождений нефти и газа (б), от центров районов гигантского нефтегазоаккумуляции (в), от крупнейших в мире месторождений железа, марганца и хрома (г), алюминия и полиметаллов (д)

явлений в ограниченном пространстве создают благоприятные условия для концентрации вещества. Развитие сейсмического процесса и образование месторождений полезных ископаемых должны быть связаны между собой.

Существование D -широт определяется механизмом распространения D -волн, которые, встречаясь на D -широтах, играют роль «спусковых механизмов» землетрясений. Причина возникновения D -волн — неравномерность вращения Земли. Следовательно, этот механизм действовал на протяжении всей геологической истории, т. е. в прошлом на тех же дискретных «сейсмичных» широтах существовали наиболее благоприятные условия для миграции флюидов и образования их скоплений. Подчеркнем, что это объяснение — не доказательство и факт приуроченности месторождений к D -широтам не зависит от этих соображений.

Глобальный характер связи крупнейших месторождений рудных полезных ископаемых с дизъюнктивными узлами показан в работе [30]. В формировании таких узлов главную роль играют «сквозные» широтные и меридиональные системы дизъюнктивных нарушений, имеющих трансконтинентальную протяженность. Ортогональная сеть рудоконцентрирующих нарушений сформировалась в течение длительного геологического времени и нашла морфоструктурное и геологическое отражение в современном лике Земли.

Рассмотрим связь с D -широтами месторождений, которые относятся к уникальным и крупным в соответствии с принятой классификацией [34]. Такая связь особенно отчетливо прослеживается в крупнейших железорудных провинциях мира. Из 19 таких провинций наиболее крупные месторождения с запасами не менее 1 млрд. т находятся на D -широтах в 16 провинциях, т. е. в 84 % рассмотренных случаев (табл. 26).



**Расстояния от центров наиболее крупных месторождений
черных и цветных металлов до ближайших Д₁ — Д₄-широт**

Месторождение	Страна	Ф, градус	Л, градус
Месторождения железных руд			
Белгородский район КМА	СССР	50,6	0,0
Сингбум	Индия	22,5	0,0
Кирунаварра	Швеция	67,8	0,3
Керченское	СССР	45,3	0,3
Бирмингем	США	33,5	0,3
Хамерсли	Австралия	-22,0	0,5
Лонгви	Франция	49,5	1,1
Зальцгиттер	ФРГ	52,2	1,6
Нимба	Республика Либерия	7,6	2,0
Уобуш	Канада	52,9	2,3
Аятское, Сарбайское	СССР	53,0	2,4
Тейское	"	53,0	2,4
Качканарское	"	58,8	2,5
Месейби	США	47,5	2,5
Фрондигем	Великобритания	53,6	2,7
Кривой Рог	СССР	47,9	2,7
Уобана	Канада	47,7	2,7
Итабирио	Бразилия	-19,6	2,7
Муссан	КНДР	42,2	2,8
Месторождения марганца			
Постамбург	ЮАР	-28,3	0,2
Нсута	Гана	5,3	0,3
Балагхат-Нагпур	Индия	21,8	0,7
Серра-ду-Навиу	Бразилия	1,0	1,0
Моанда	Габон	-1,4	1,4
Тамбао	Буркина-Фасо	14,8	2,1
Мору-ду-Уркун	Бразилия	-19,2	2,3
Никопольское	СССР	47,6	2,6
Чиатурское	"	42,3	2,7
Имини	Марокко	31,1	2,7
Месторождения хрома			
Кемпирсайское	СССР	50,2	0,4
Солсбери	Зимбабве	-17,5	0,6
Гулеман	Турция	38,4	1,0
Рустенбург	ЮАР	-25,7	2,4
Лейденбург	"	-25,2	2,7
Селукве	Зимбабве	-19,7	2,8
Месторождения бокситов			
Боке	Гвинея	11,2	0,0
Паранам	Суринам	5,6	0,0
Туге	Гвинея	11,4	0,2
Кауа	США	22,0	0,5
Посус-ду-Калдас	Бразилия	-22,0	0,5
Ньенихин	Гана	6,3	0,7
Парнас	Греция	38,5	0,9
Гов	Австралия	12,1	0,9
Арканзас	США	34,7	0,9

Месторождение	Страна	Ф. градус	λ, градус
Калхапур	Индия	15,9	1,0
Джаррадейл	Австралия	—32,8	1,0
Ямайка	Ямайка	18,2	1,3
Уэйпа	Австралия	—12,7	1,5
Манантенина	Мадагаскар	—24,3	1,8
Вар	Франция	43,5	1,5
Гант	Венгрия	47,4	2,4
Митчел-Плато	Австралия	—14,4	2,5
Чжи-Бо	КНР	36,8	2,6

Месторождения свинца и цинка

Олькуш	Польша	50,3	0,3
Анвилл	Канада	62,3	0,4
Мегген	ФРГ	51,1	0,5
Серра-де-Паско	Перу	—10,7	0,5
Агилляр	Аргентина	—23,2	0,7
Сулливен	Канада	49,7	0,9
Маттагами	"	49,7	0,9
Пайн-Пойнт	"	60,9	1,0
Брокен-Хилл	Австралия	—32,0	1,8
Кидд-Крик	Канада	48,7	1,9
Вибурум	США	37,5	1,9
Цумб	Намибия	—19,2	2,3
Брокен-Хилл	Замбия	—14,5	2,4
Три-Стейтс	США	36,9	2,5
Трепча	Югославия	42,9	2,1

На Д-широтах находятся также восемь из десяти самых крупных месторождений марганца и 6 наиболее крупных в мире месторождений хрома. В целом 30 из 35 самых крупных в мире месторождений черных металлов, расположенных в разных рудных провинциях, лежат на Д-широтах (см. рис. 62), причем в эту группу попадают месторождения различного генезиса.

Среди крупных зарубежных месторождений цветных металлов приуроченность к Д-широтам более всего обнаруживают месторождения бокситов и полиметаллов. Из 18 самых крупных в мире месторождений бокситов на Д-широтах лежат 14 месторождений, причем 11 из них — на Д₁—Д₄-широтах. Из 15 самых крупных зарубежных месторождений свинца и цинка к Д-широтам приурочены 11 (Д₁—Д₄—8, Д₅—3) (табл. 26 и рис. 62).

Для других металлов связи с Д-широтами крупных месторождений не наблюдается. Возможно, это объясняется относительно более низким по сравнению, например, с черными металлами или бокситами содержанием полезного компонента в рудах (доли процента, реже — первые проценты). Поэтому величина запасов металла даже в уникальных по размерам

месторождениях будет гораздо ниже, чем запасы крупных месторождений нефти и газа или железных руд. Такие месторождения могли формироваться и при более низкой сейсмической активности, чем та, которая характерна для Д-широт. Вместе с тем представляется любопытным следующий факт. Если рассматривать выборку, в которую войдут по одному самому крупному в мире месторождению полиметаллов, бокситов, меди, олова, вольфрама, молибдена, никеля, кобальта, ртути, мышьяка, то на Д-широтах окажется 8 из 10 месторождений этой выборки (табл. 27).

Таким образом, Д-широты контролируют не только эпицентры крупнейших землетрясений в сейсмоактивных областях, но и положение дизъюнктивных узлов с наиболее крупными месторождениями нефти, газа, битумов, черных и некоторых цветных металлов. Поскольку протяженность самих месторождений по меридиану редко превышает 1° , то можно утверждать, что не только центры месторождений, но и их запасы в большинстве случаев будут заключены в зонах Д-широт.

Приведенные данные свидетельствуют в пользу плодотворности идеи о связи сейсмоструктурных факторов с формированием месторождений полезных ископаемых. Вместе с тем надо подчеркнуть, что очаги средних и слабых землетрясений, так же как и средние и мелкие месторождения, не обнаруживают преимущественной приуроченности к Д-широтам.

В заключение необходимо подчеркнуть, что связь Д-широт с месторождениями полезных ископаемых была обнаружена не в результате эмпирических поисков геометрических закономерностей в расположении существующих месторождений, а в результате логического анализа принятых теорий. Обнаруженная закономерность позволяет ввести дополнительные факторы в изучение геологических процессов, которые приводят к формированию и контролируют размещение крупнейших месторождений полезных ископаемых.

Таблица 27

Расстояние от наиболее крупных в мире месторождений цветных металлов до ближайшей из Д₁—Д₄-широт

Полезное ископаемое	Месторождение	Страна	φ, градус	Δ ₄ , градус
Молибден	Кляймакс	США	39,4	0,0
Медь	Эль-Теньете	Чили	34,1	0,3
Ртуть	Альмаден	Испания	38,7	0,7
Полиметаллы	Пайн-Пойнт	Канада	60,9	1,0
Алюминий	Уэйпа	Австралия	—12,7	1,5
Никель	Седбери	Канада	46,5	1,5
Кобальт	Бу-Аззер	Марокко	30,5	2,4
Вольфрам	Цзянси	КНР	25,7	2,4
Мышьяк	Болиден	Швеция	64,9	2,6
Олово	Потоси	Боливия	19,6	2,8

Полученные результаты основаны на предположении, что крупнейшие месторождения образовывались в прошлые геологические эпохи на Д-широтах. Кроме того, показано, что они и сейчас находятся на Д-широтах. Из этого следует, что положение широт относительно полюса вращения Земли за это время не изменилось.

К аналогичным выводам пришли и другие исследователи. В основном они основывались на существовании планетарной сети разломов долготного и широтного простиранья. Вот как излагается, например, в работе [24] точка зрения Г. Штилле. Если связать тектонику широтного и меридионального простиранья с вращением Земли при современном положении полюсов, то в существующем издавна постоянстве этой ориентировки заключается убедительнейший довод против представлений о значительных перемещениях полюсов.

Близкие представления о планетарном характере тектонических швов развивал Н. С. Шатский, подчеркивая, что крупные погружения и другие процессы в коре часто ограничиваются планетарными швами ортогональных (широтных и меридиональных) и диагональных систем. Идея планетарной трещиноватости была значительно развита С. С. Шульцем, считающим, что ориентировка систем трещин, одинаковая для всех континентов, связана с ротационным режимом Земли.

Резюмируя материал по платформенной трещиноватости, Ю. А. Косыгин высказывает два предположения: 1) ось вращения Земли и положение материков относительно нее оставались постоянными (по крайней мере на протяжении формирования этих трещин), 2) материки могли перемещаться по планете, не меняя существенно своей ориентировки относительно полюсов [23]. Последнее предположение обсуждается также в работах В. А. Буша.

Полученный результат противоречит современным мобилистским теориям. Это не означает, что они должны быть отвергнуты. Во-первых необходимо предпринять усилия по согласованию концепции Д-волн и мобилистских теорий, во-вторых, переинтерпретировать полученный результат, в-третьих, пытаться внести изменения в мобилистские теории и лишь в последнюю очередь отвергать мобилистские теории. История науки знает множество случаев, когда различные научные теории казались противоречащими друг другу или фундаментальным научным принципам, однако развитие науки всегда разрешало эти противоречия.

Таким образом, на примере развития гипотезы Д-волн были продемонстрированы особенности завершающего этапа анализа данных — построения модели (или теории). Можно отметить важную роль некоторых руководящих принципов — простоты, симметрии, абстрагирования, внутренних критериев. Процесс развития модели демонстрирует непрерывное взаимодействие между исходными данными и теорией. Теория (модель)

является управляющей схемой для анализа данных, помогающей вскрывать в этих данных новые закономерности. Вскрытые закономерности, в свою очередь, укрепляют веру в конструктивные возможности модели и дают импульс для дальнейшего ее совершенствования. Таким образом, построение теории не является конечным пунктом исследования, а исходной точкой для нового витка анализа данных.

Глава XI

ПРОВЕРКА ПРОГНОЗОВ

Со времени выполнения некоторых работ по распознаванию и прогнозированию прошло примерно 15 лет. Это позволяет вернуться к этим работам и выяснить, насколько хорошими были полученные решающие правила. Ведь рассмотренные методы решения задач являются неформальными. Поэтому так много внимания было уделено методам проверки эффективности решающих правил. Но даже после успешного проведения всех испытаний нельзя быть полностью уверенным в том, что полученные решения соответствуют истине.

Решающие правила, полученные для разделения нефтеносных и водоносных песчаников девона Ромашкинского и соседних месторождений, были испытаны на большом материале и показали хороший результат, да и вся работа носила в основном методологический характер. Решающие правила, полученные для карбонатных отложений Оренбургской и Пермской областей, имели большую практическую значимость. В Пермской области решающее правило было получено на ранней стадии эксплуатации месторождений и позволило установить отметку водонефтяного контакта (ВНК) на ряде площадей (Ножовской,

Таблица 28

Сравнение отметок ВНК на месторождениях Пермской области

Площадь	Ярус	Результат	
		машины	геолога
Ножовская	Турнейский	1410	1412
	Башкирский	1060	1069
Бугровская	Турнейский	1408	1414
	Башкирский	1085	1088
Березовская Северная	Турнейский	1408,5	1416
Березовская Южная	„	1402,5	1416
Опалихинская	„	1412	1416
	Башкирский	1054	1067
Троельжанская	Турнейский	1501	1502
Лазуковская	„	1609	1610
Кукуштанская	„	Вода	Вода

Бугровской, Березовской, Опалихинской, Юмышской, Кукуштанской). Было также показано, что на всех исследованных площадях Оренбургской и Пермской областей принятый ВНК регулярно выше (на 2—15 м) отметки ВНК, полученного с помощью программ распознавания (табл. 28). Однако до сих пор нет ответа на вопрос: можно ли получать нефть из этих неясных интервалов?

Возможно, что программы распознавания регулярно ошибаются, но возможно, что опробование этих интервалов не ведется из боязни получить при опробовании воду, хотя цена ошибки первого рода (пропуск цели) очень велика. В некоторых других задачах проверить полученные ранее решающие правила оказалось возможным (прогноз оруденения, прогноз мест сильных землетрясений, прогноз времени, места и магнитуды землетрясений по Д-волнам).

§ 1. ПРОГНОЗНАЯ КАРТА РУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В 1963 г. были получены первые результаты разделения нефтеносных и водоносных пластов с помощью программ распознавания. Уже в 1964 г. П. А. Шехтман (САИГИМС) предложил своему аспиранту Т. М. Марипову изучить возможности применения таких программ для оценки рудоносности однородных геологических блоков [21]. В качестве объекта исследования было выбрано одно из рудных полей Средней Азии, разведываемое и эксплуатируемое в течение десятков лет. В основу сбора и систематизации геологических данных положена структурно-прогнозная карта рудного поля, составленная Н. А. Никифоровым и др. Карта построена по кровле рудовмещающего горизонта и отражает тектоническое строение рудного поля (оси складок, разломов и др.). На ней выделено 220 геологически однородных блоков.

Геологически однородным блоком называется участок месторождения, который имеет естественные геологические границы, литологически однороден, во всех своих частях сохраняет единый характер деформации и единое положение по отношению к тектоническим элементам структуры.

Для оценки рудоносности каждого блока была собрана геологическая информация, характеризующая основные факторы размещения оруденения на месторождении. Во входной вектор были включены следующие параметры, характеризующие каждый блок: азимут падения, угол падения, расстояния от осей складок II и III порядков, расстояния от разломов продольного и косога направления, мощность рудовмещающего горизонта, коэффициенты пластичности (хрупкости) пород и среднее содержание металла по данным металлометрии.

Для обучения и экзаменов выбирались блоки, которые удовлетворяли следующим условиям.

1. Блоки достаточно разведаны, и рудоносность их определена. К разведанным блокам отнесены такие, которые имеют не менее шести разведочных пересечений (скважин и горных выработок).

2. К рудным блокам отнесены те блоки, которые содержат кондиционные руды: мощность рудного тела в пересечении не менее 1 м, содержание металла не менее 0,08 %.

3. К безрудным отнесены те блоки, которые не содержат кондиционной руды.

Всего на рудном поле оказалось 11 безрудных и 20 рудных блоков. Однако часть этих блоков имела информацию не по всем девяти параметрам, включенным во входной вектор. В результате для обучения были отобраны семь безрудных и девять рудных блоков.

При экзамене девяти заведомо рудоносных блоков по программе «Кора-3» восемь из них были правильно отнесены к рудоносным и лишь один из них (блок 201) — к безрудным.

Кроме этих девяти блоков, ЭВМ проанализировала еще 73 блока, перспективность которых было желательно установить. Все блоки расположены по степени достоверности заключения ЭВМ об их рудоносности — от наиболее достоверно рудоносных до наиболее безрудных — и разбиты на четыре категории. Заключение считалось тем более достоверным, чем больше оказался перевес голосов.

К первой категории перспективности отнесены те блоки, которые имели перевес в три и более признаков рудоносности. Вторая категория — перевес от одного до трех признаков, третья — признаки «рудных» и «безрудных» распределены поровну, четвертая категория — перевес «безрудных» признаков.

Если подсчитать коэффициент удачи по каждому блоку, т. е. отношение числа скважин, пробуренных в блоке и встретивших руду, к общему числу пробуренных в блоке скважин, то окажется, что для 10 наиболее перспективных по заключению программы «обобщенный портрет» блоков этот коэффициент удачи в среднем равен 0,52, а для 10 наименее перспективных он равен лишь 0,22, т. е. машина позволяет выделить блоки, на которых вероятность пересечь скважиной рудное тело почти в 2,5 раза выше, чем в безрудном блоке.

С 1963 по 1968 г. на месторождении было пробурено 90 скважин в блоках, по которым имелся машинный прогноз. В 1969 г. по инициативе математиков была оценена достоверность построенной в 1965 г. прогнозной карты. Табл. 29 дает возможность сравнить результаты бурения с прогнозом по блокам каждой категории.

Результаты прогнозирования по блокам IV категории необходимо оценивать с учетом того, что в большинстве блоков этой категории пробурено по одной скважине. В целом по перспективным блокам (I и II категории) фактический коэффициент рудоносности оказался равным 0,53, а предсказанный 0,48.

Коэффициенты рудоносности для блоков различной категории

Категория прогноза	Число блоков	Прогнозный коэффициент рудоносности	Число пробуренных скважин	Число рудных скважин	Фактический коэффициент рудоносности
I	20	0,52	43	24	0,55
II	25	0,40	24	12	0,50
III	11	0,30	14	2	0,14
IV	17	0,22	9	5	0,55

По неперспективным блокам (III и IV категории) фактический коэффициент рудоносности 0,3, предсказанный 0,27.

По некоторым блокам, в которых было пробурено пять и более скважин, можно выяснить надежность прогноза по отдельным блокам (табл. 30).

Из табл. 30 видно, что в пяти блоках из шести прогноз оказался правильным. В блоке 107 все скважины пробурены почти рядом, а сам блок имеет большое протяжение и сложное строение.

Таким образом, и общий прогноз, и прогноз по отдельным блокам, полученный с помощью программы распознавания, оказались удовлетворительными. Вместе с тем нельзя не отметить странность стратегии разбуривания рудного поля. Из шести блоков, в которых было пробурено пять и более скважин (см. табл. 30), четыре относятся к III категории перспективности согласно составленной Н. А. Никифоровым геологической прогнозной карте, причем 88 % всех скважин пробурено в блоках III категории. С другой стороны, отмечается четкая направленность бурения — на блоки высокой перспективности согласно машинной оценке! Вместе с тем известно, что машинной прогнозной картой на данном месторождении не пользовались.

Таблица 30

Сравнение результатов прогноза геологов и ЭВМ

Номер блока	Категория прогноза		Число скважин в блоке	Число рудных скважин
	машинного	геологического		
7	II	III	9	6
57	III	III	6	1
78	I	I	5	3
80	II	III	25	19
105	I	III	6	4
107	I	I	5	0

Этим фактам можно дать два объяснения. Первое состоит в том, что геологи действуют по алгоритмам, которые формально нигде не зафиксированы и по которым перспективность блоков оценивается не так, как на карте Н. А. Никифорова, а ближе к машинному прогнозу. Второе объяснение может состоять в том, что разбуривание ведется случайным образом или по соображениям, не имеющим ничего общего с геологической оценкой блоков. При этом в случае удачной скважины в этом же блоке бурится много скважин и таким образом достигается хорошая статистика. Ведь в табл. 30 приводятся данные по блокам, в которых пробурено не менее пяти скважин. Весьма вероятно, что если первые две-три скважины в блоке не вскрыли рудного тела, то дальнейшее бурение в этом блоке прекращается. Поэтому пять и более скважин оказываются пробуренными в блоках, в которых первые скважины оказались удачными.

Выяснение всех этих вопросов и надежная оценка машинной карты имеют большое значение для совершенствования процессов разведки. Однако за прошедшие 20 лет ни одна геологическая организация не заинтересовалась этими проблемами.

§ 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА МЕСТ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В работах 1969—1974 гг. [18, 28, 29, 42], которые были выполнены под руководством И. М. Гельфанда и В. И. Кейлиса-Борока, была решена задача определения мест будущих сильных землетрясений для ряда сейсмоактивных регионов мира с применением методов распознавания по единому комплексу геолого-геоморфологических данных.

Решение задачи опиралось на следующее предположение: эпицентры сильных землетрясений могут располагаться только в окрестности пересечений линеаментов трех высших рангов, но не во всех пересечениях. Соответственно разделим все пересечения на В (высокосейсмичные) и Н (низкосейсмичные). Некоторые из пересечений В лежат вблизи уже известных эпицентров (B_1), остальные — вдали от известных эпицентров (B_2). Пересечения B_2 — это места, в которых сильные землетрясения происходили в прошлом (но нам это неизвестно) и в которых сильные землетрясения будут происходить в будущем. Пересечения B_1 — это места, в которых сильные землетрясения происходили в прошлом, нам это известно и в них будут происходить сильные землетрясения и в будущем. Задача заключалась в том, чтобы определить пересечения B_2 .

Задача решалась с помощью алгоритма распознавания «Подклассы». Объекты (пересечения) были описаны комплексом геолого-геоморфологических данных, характеризующих интенсивность и контрастность новейших движений. Были рассмотрены следующие регионы: Памир и Тянь-Шань [8], че-

тыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы [4, 5], Калифорния и смежные территории [6], Италия [10] (все вместе они образуют область Ω). Для каждого региона были найдены пересечения В и Н. Окрестностью точки будем считать круг радиусом 50 км. Окрестности точек В образуют область Ω_B , окрестности точек Н — область Ω_H , окрестности известных эпицентров — область Ω_3 . Согласно прогнозу, эпицентры будущих сильных землетрясений будут располагаться в области $\Omega_{\Pi} = \Omega_B \cup \Omega_3$.

В 1974—1984 гг. в перечисленных выше регионах произошло 15 сильных землетрясений (с $M \geq 6,0$ в Италии и с $M \geq 6,5$ в остальных регионах). Они даны в табл. 31, M обозначает максимальную магнитуду, указанную в каталогах или оперативных бюллетенях. Из табл. 31 видно, что лишь один эпицентр из 15 оказался вне области прогноза и вообще вдали от всех пересечений. Это соотношение характеризует надежность исходной геологической гипотезы и имеющейся схемы линейментов. Из 14 эпицентров, попавших в область Ω_{Π} , 10 попали в область Ω_3 , т. е. оказались вблизи уже известных эпицентров, а четыре — в область Ω_{Π}/Ω_3 , где такие землетрясения до сих пор не были зарегистрированы. Именно эти четыре землетрясения и отражают истинную эффективность разработанных методов прогноза. Область Ω_{Π}/Ω_3 составляет 40 % от той части области прогноза Ω_{Π} , где в XX в. не наблюдались сильные землетрясения. В предположении равномерности распределения эпицентров вероятность такого события (четыре

Таблица 31

Список сильных землетрясений 1974—1983 гг.

Дата	Ф, градус	λ, градус	M	Регион	Область
11.8.1974	39,4	73,9	7,3	Памир и Тянь-Шань	Ω_3
27.3.1975	40,42	26,14	6,7	Малая Азия и Юго-восточная Европа	Ω_3
6.9.1975	38,47	40,72	6,7	То же	—
24.11.1976	39,12	44,03	7,3	„	Ω_{Π}/Ω_3
24.3.1978	42,9	78,6	7,0	Памир и Тянь-Шань	Ω_{Π}/Ω_3
20.6.1978	40,74	23,23	6,6	Малая Азия и Юго-восточная Европа	Ω_3
1.11.1978	39,4	72,6	6,8	Памир и Тянь-Шань	Ω_3
15.10.1979	32,6	—115,33	6,9	Калифорния	Ω_3
25.5.1980	37,6	—118,84	6,5	„	Ω_{Π}/Ω_3
23.11.1980	40,91	15,37	7,2	Италия	Ω_3
24.2.1981	38,22	22,93	6,7	Малая Азия и Юго-восточная Европа	Ω_3
18.1.1982	40,0	24,3	6,8	То же	Ω_3
17.1.1983	38,02	20,23	7,0	„	Ω_3
2.5.1983	36,14	—120,5	6,5	Калифорния	Ω_3
6.7.1983	40,14	24,77	7,0	Малая Азия и Юго-восточная Европа	Ω_{Π}/Ω_3

эпицентра из четырех попадают в заранее выделенные 40 % площади) составляет менее 0,03. Если же отказаться от предположения, что сильные землетрясения могут возникать только около пересечений линеаментов, и принять, что они могут располагаться равномерно на всей территории рассматриваемых регионов, то отношение благоприятных и неблагоприятных событий будет 4:1, отношение площадей станет равным 23 % и соответствующая вероятность будет менее 0,01.

Проведенная проверка позволяет сделать следующие выводы.

1. Подтвердилась гипотеза, что сильные землетрясения происходят вблизи пересечений или вблизи уже известных эпицентров.

2. Подтверждается прогноз мест будущих сильных землетрясений в регионах Памир и Тянь-Шань, Юго-Восточная Европа и Малая Азия, Калифорния и Италия.

3. Используемая при построении прогнозных карт методика может быть применена для решения аналогичной задачи в других регионах.

4. Показано, что объем выборки для обучения в 15—25 объектов оказывается достаточным для получения надежных результатов, что важно для многих других работ по распознаванию.

§ 3. ПРОГНОЗ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО Д-ВОЛНАМ

Долгосрочный прогноз сильных землетрясений является существенным этапом в общей схеме прогноза землетрясений. В конце 1977 г. был дан долгосрочный прогноз для 17 регионов мира, основанный на гипотезе Д-волн [15]. В каждом регионе были указаны интервалы времени (совпадающие с моментами прихода в Д-центр региона одной из глобальных Д-волн), когда в регионе могут возникать землетрясения с магнитудой M выше порога M_0 . При этом не предполагалось, что землетрясения обязательно произойдут в указанные интервалы времени. Утверждалось только, что вне этих интервалов такие землетрясения маловероятны ($p < 0,2$).

В 1984 г. была предпринята проверка прогноза. За 1978—1983 гг. в этих 17 регионах произошло восемь сильных землетрясений (с магнитудой M , превышающей порог для соответствующего региона) и шесть из них попали в те интервалы времени, которые были выделены как интервалы повышенной вероятности. Это давало возможность проверить статистическую значимость использованной гипотезы (гипотезы Д-волн) и информативность долгосрочного прогноза.

За 1978—1983 гг. в этих регионах произошло восемь землетрясений с магнитудой, превышающей M_0 . Считается, что магнитуда землетрясения превысила порог M_0 , если хотя бы одна из магнитуд M_s или M_L превысила этот порог. Параметры этих

Сильные землетрясения на период 1978—1983 гг. в Д-регионах

Номер землетрясения	Дата	Ф, градус	λ, градус	M	Номер региона
1	1978, март	43,3	78,5	6,6	9
2	1978, март	44,1	148,3	8,0	15
3	1978, июнь	38,4	141,9	7,5	16
4	1978, ноябрь	39,3	72,6	7,0	8
5	1980, ноябрь	40,9	15,3	6,8	10
6	1981, январь	38,7	142,8	7,3	3, 17
7	1983, май	35,7	-120,0	6,7	6
8	1983, май	39,8	139,4	7,9	3

землетрясений даны в табл. 32. В табл. 23 эти события отмечены кружками. Одно из этих землетрясений (6, $M = 7,3$) принадлежит и региону 3 (Япония II), и региону 17, который является подрегионом региона 3. Поскольку широты Д-центров этих регионов отличаются на $0,15^\circ$, времена прихода Д-волн в эти Д-центры отличаются на 1 год (поскольку скорость Д-волн составляет $0,15^\circ$ в год). Это позволяет рассматривать попадание землетрясения в интервал тревоги каждого из регионов как независимые события. Из сравнения табл. 23 и 33 видно, что в семи случаях из девяти землетрясения произошли в предсказанные интервалы времени (см. гл. X).

Для оценки значимости прогноза рассмотрим следующий случайный процесс. Каждое событие происходит в одном из N регионов с вероятностью P_i . В каждом регионе плотность вероятности событий равномерна во времени и вероятность попадания события в интервал тревоги равна доле времени тревоги в регионе r_i . Какова вероятность P того, что семь (или более) из девяти событий попадут в интервал тревоги? Этот случайный процесс моделировался на ЭВМ. Величина P_i оценивалась по числу землетрясений n_i , происшедших в каждом из районов в XX в.: $P_i = n_i / \sum n_i$ (данные из работы [15]). Значения r_i взяты из табл. 23. Было проведено 40 000 испытаний, и получена оценка $P = 0,0018$. Можно оценить вероятность P только для тех восьми регионов, где в действительности произошли землетрясения (в этих регионах среднее время тревог выше, чем в остальных регионах). В этом случае моделирование дало оценку $P = 0,0042$.

Таким образом, значимость прогноза на основании концепции Д-волн оценивается на уровне $> 0,99$. Этот факт является еще одним подтверждением самой концепции Д-волн. Заметим также, что в случае неудачного прогноза это не могло бы стать достаточным аргументом для опровержения гипотезы Д-волн, ибо прогноз основан также и на гипотезе Д-центров, которая могла бы быть неверной.

Обсуждаемый метод прогноза удачно комплексирован с другими долгосрочными прогнозами (например, со строго форма-

лизованными прогнозами В. И. Кейлис-Борока и др.). В этих прогнозах время тревоги 3—5 лет и более, а общее время тревоги занимает 25—30 % всего времени. В прогнозе по Д-волнам время тревоги разбито на годовичные интервалы. Одновременный учет обоих прогнозов сократил бы время тревоги в 3—4 раза.

Итак, проверка прогноза землетрясений за 1978—1983 гг. показала хорошую подтверждаемость прогноза и его высокую значимость. Однако в самом прогнозе, опубликованном в 1978 г., содержатся ошибки. Их нетрудно выявить. Если их исправить до формальной проверки прогноза, то это будет выглядеть как подгонка результатов. Однако, после того как показана высокая значимость прогноза, имеет смысл эти ошибки исправить.

Для региона 3 (Япония II) в прогнозе указаны следующие времена прихода Д-волн в Д-центр: 1979, 3; 1980, 8; 1983, 3; 1991, 0; 1998, 7. В момент $T = 1979, 3$, в Д-центр ($\varphi_D = 39,2^\circ$) придет Д-волна, которая в момент $T_0 = 1900,0$ располагалась на широте $51,1^\circ$ и двигалась от полюса к экватору. Действительно, за 79,3 года она прошла $79,3 \cdot v = 79,3 \cdot 0,15 = 11,9^\circ$ и оказалась на широте $51,1 - 11,9 = 39,2^\circ$, т.е. в Д-центре региона 3. Следующая Д-волна, которая идет со стороны полюса в направлении региона 3, в момент T_0 была на широте $51,925^\circ$ и придет в Д-центр в момент $T_0 + \frac{51,925 - 39,2}{0,15} = 1900,0 + 84,8 = 1984,8$.

Д-волна, которая придет в Д-центр в момент $T = 1980,8$, в момент T_0 находилась на широте $27,075^\circ$ и двигалась в сторону полюса. Расстояние между широтами $27,075$ и $39,2^\circ$ она пройдет за $\frac{39,2 - 27,075}{0,15} = \frac{12,125}{0,15} = 80,8$ года

и окажется в Д-центре в момент $T = 1980,8$ (как это и записано было в прогнозе). Следующая Д-волна, идущая к региону 3 с юга, в момент T_0 находилась на широте $25,55^\circ$ и должна прийти в Д-центр в момент $T = T_0 + \frac{39,2 - 25,55}{0,15} = 1991,0$

(что также зафиксировано в прогнозе).

Таким образом, вместо момента 1984,8 в прогнозе было ошибочно зафиксировано время 1983,3. Все использованные выше данные содержатся в той же работе, в которой опубликован прогноз [13].

В результате этой ошибки оказалось предсказанным землетрясение в регионе 3, происшедшее в мае 1983 г. ($M = 7,9$). Исправление ошибки в прогнозе означает, что это землетрясение оказалось непредсказанным.

Другая ошибка обнаружена в прогнозе для региона 10 (Италия I). В прогнозе указан ближайший момент $\theta_j = 1980,1$.

Однако обращает на себя внимание следующее противоречие. В соседнем регионе 11 (Анатолия) указан тот же самый момент $\theta = 1980,1$. Однако положение Д-центров этих регионов различается на $0,05^\circ$ ($\varphi_D = 39,1$ для Анатолия и $\varphi_D = 39,15$ для Италии I), как указано в табл. 23. Следовательно, моменты тревог, вызванные одной волной, должны отличаться на 0,33 года.

Правильным является прогноз для региона 11. Волна, которая в момент T_0 была на широте $51,1^\circ$, придет в Д-центр этого региона на широте $39,1^\circ$ в момент $T = T_0 + [(51,1 - 39,1)/0,15] = 1980,0$. Волна, которая в момент T_0 была на широте $27,075^\circ$, придет в Д-центр в момент $T = T_0 + [(39,1 - 27,075)/0,15] = 1980,2$. Поскольку обе встречные волны придут в центр почти одновременно, в прогнозе был указан один момент¹ 1980,1. Эти же две Д-волны придут в Д-центр региона 10 ($\varphi_D = 39,15^\circ$) соответственно на 0,33 года раньше (для Д-волны, идущей от полюса) и на 0,33 года позже (для Д-волны, идущей от экватора), т.е. в моменты 1979,7 и 1980,5. Это и есть правильный прогноз для региона 10 (Италия I) на 1978—1984 гг. При этом оказывается, что землетрясение, происшедшее в регионе 10 в ноябре 1980 г. ($M = 6,8$) и не предсказанное опубликованным прогнозом, в действительности правильно предсказано.

При анализе этой ошибки было уточнено также положение Д-волны в момент T_0 на широте $51,1^\circ$. Эта Д-волна определена по положению единственного землетрясения 16.V.1968 г. ($\varphi = 40,9$; $\lambda = 143,5$; $M = 8,2$). Соответственно Д-волна в момент $T_0 = 1900,0$ должна находиться на широте $68,4/0,15 = 51,17$, а не $51,10^\circ$. Это исправление влечет за собой исправление двух других прогнозов, которые вызваны приходом этой же Д-волны в другие регионы. В регионе 3 прогноз изменяется с 1979,3 на 1979,7, а в регионе 17 — с 1980,5 на 1980,9. Первый из прогнозов оказался ложной тревогой, и поэтому его изменение ничего в прогнозе не меняет. Второй прогноз (в регионе 17) оправдался землетрясением в январе 1981 г., который отстоял от момента прихода волны (1980,5, т.е. июль 1980 года) на 0,5 года. После исправления прогноза на 1980,9 время между приходом Д-волны и моментом землетрясения сократилось до 1 мес.

Рассмотрим теперь положение происшедших за 1978—1983 гг. землетрясений относительно границ регионов. Во всех случаях положение новых землетрясений не вызывает сомнений в их принадлежности данному региону. Лишь в одном случае эпицентр расположен явно вне множества землетрясений, по которому определялись границы регионов. Это относится

¹ Такие небольшие погрешности (0,1—0,2) казались при составлении прогноза несущественными, поскольку малы по сравнению с предполагаемой точностью определения положения Д-волн.

к землетрясению 1983 года ($M=7,9$) в регионе 3, в котором это землетрясение не было предсказано. Меридиональные границы региона должны были бы быть формально определены на меридианах $\lambda_{\min} = 142,0$ и $\lambda_{\max} = 147,0$.

В этом случае землетрясение 1983 г. не принадлежит региону 3. Это землетрясение вызвало повышенный интерес у сейсмологов, ибо возникло намного западнее области, в которой известны землетрясения такой большой магнитуды. Эпицентр его лежит в море у западных берегов Японии. Эта зона до сих пор была известна как зона, в которой наиболее сильные землетрясения происходят на промежуточных глубинах.

Таким образом, после исправления ошибок правильно оказались предсказанными семь событий из восьми, а не из девяти, как мы считали первоначально, поскольку землетрясение 1983 г. не принадлежит региону 3. Единственное непредсказанное землетрясение (регион 9, 1978 г.) произошло на 3 мес. раньше предсказанного срока. Остальные землетрясения за эти 6 лет оказались предсказанными верно.

Столь хороший результат прогноза заставляет с большим вниманием отнестись к некоторым парадоксам, выявившимся в процессе построения прогноза. Так как исходными данными для построения прогноза являются только каталоги землетрясений, то точность всех построений определяется точностью определения параметров землетрясений. Погрешность определения момента землетрясений намного превосходит погрешность прогноза ($\pm 0,5$ года). Точность определения магнитуды влияет на состав выборки (все землетрясения с $M \geq M_0$). Это могло изменить множество Д-волн, но не влияло на точность их положения. Точность положения глобальных Д-волн определяется в первую очередь точностью определения эпицентров.

Положение Д-центра определяется с погрешностью $0,05^\circ$. Конечно, это намного точнее, чем предполагаемая точность положения Д-волн. Однако такая точность достигается, вероятно, за счет того, что положение Д-центра определяется по нескольким Д-волнам одновременно. Однако трудно объяснить, почему моменты землетрясений отстают от моментов прихода Д-волн в Д-центр в подавляющем большинстве случаев не более чем на 0,5 года. Ведь это соответствует погрешности определения положения большинства Д-волн в $0,075^\circ$. Трудно придумать этому объяснение, если погрешность определения эпицентров составляет от $0,1^\circ$ в наши дни до $0,5^\circ$ и более в начале века. Этот факт настолько парадоксален, что может поставить под сомнение реальность прогноза землетрясений. Нам остается только ждать. Если прогнозы в Д-регионах будут оправдываться и в дальнейшем, то придется тщательно исследовать эту проблему, пересмотреть методы оценки точности определения координат эпицентров. Если же прогнозы перестанут оправдываться, то можно будет констатировать, что это произошло в полном соответствии с законами статистики.

В свете столь высокой точности прогнозов (относительно точности исходных данных) необходимо пересмотреть систему глобальных волн. Во-первых, необходимо вычислять положение Д-волн с большей точностью, во-вторых, разъединить те глобальные Д-волны, которые в прогнозе 1977 г. были объединены исходя из принятой точности определения эпицентров. В результате возникла вторая версия множества глобальных Д-волн, построенных на том же множестве землетрясений, что и первая. Их положение на 1.1.1900 г. дано в табл. 33. По положению Д-центров и положению Д-волн можно вычислить прогноз по 17 регионам до 1990 г. (а при желании и далее). Этот прогноз представлен в табл. 34.

Таблица 33

Положение глобальных Д-волн на 1.1. 1900 г.

Положение	φ, градус						
К полюсу	21,40	24,40	25,08	25,55	25,98	26,40	27,07
	28,60	30,12	30,44	30,65	31,22	31,75	32,00
	32,57	32,85	34,22	34,68	35,10	35,45	36,90
От полюса	45,15	46,37	47,12	48,42	49,30	49,83	50,32
	51,17	51,98	52,66	53,00	53,32	53,80	54,28
	55,37	55,92	57,48	58,43	59,05	59,61	59,87

Примечание. Приведены только те Д-волны, которые проходят через указанные 17 Д-регионов в последней четверти XX в.

Таблица 34

Прогноз времени землетрясений (вторая версия системы Д-волн)

Номер региона	Регион	Прогноз на 1984—1990 гг.				
1	Чили I	1986,47	1987,47	1991,0		
2	Чили II	1988,13				
3	Япония II	1985,23	1985,33	1988,14	1989,73	1991,00
4	КНР	1988,67				
5	Новая Зеландия	1987,0	1988,07	1989,80	1990,33	
6	Северная Калифорния	1984,8	1989,13	1989,33		
7	Центральная Калифорния	1989,47	1990,67			
8	Средняя Азия	1985,67	1987,17	1987,80	1991,0	
9	Тянь-Шань—Алтай	1985,67	1987,07	1989,16		
10	Италия I	1985,0	1985,57	1987,8	1990,07	1990,67
11	Анатолия	1984,67	1985,90	1987,47	1990,33	
12	Карпаты	1986,67	1988,17	1988,33		
13	Италия II	1987,0	1987,67	1989,5	1990,73	
14	Япония III	1986,8	1990,47			
15	Курилы—Япония	1987,2	1987,87			
16	Япония IIa	1984,47	1987,33	1988,9		
17	Япония IIб	1984,33	1986,23	1987,14	1990,0	

Новая версия системы глобальных волн отличается от предыдущей тем, что в ней по-иному определены землетрясения с $M_s \geq 8,0$, лежащие на одной Д-волне. Если в первой версии было принято, что землетрясения, отстоящие от Д-волны на $0,5^\circ$, могут принадлежать этой Д-волне, то во второй версии — лишь при расстоянии, меньшем $0,25^\circ$. В противном случае это землетрясение определяло новую Д-волну. Таким образом, во второй версии число Д-волн возросло. При этом возросло общее число тревог при прогнозе землетрясений, что снижает значимость прогноза. Вместе с тем новый способ определения Д-волн по землетрясениям дает и выигрыш.

Рассмотрим Д-волну, которая, двигаясь к полюсу, располагалась в 1900 г. на широте $25,55^\circ$ (см. первую версию системы Д-волн в [13]). Эта Д-волна определялась по двум эпицентрам землетрясений с $M_s \geq 8,0$. Одно из них произошло 28.II.1969 г. ($\varphi = 36,0^\circ$, $\lambda = -10,5^\circ$, $M_s = 8,0$), другое — 20.XII.1946 г. ($\varphi = 32,5^\circ$, $\lambda = 134,5^\circ$, $M_s = 8,4$). Каждое из них может быть порождено своей Д-волной; в 1900 г. они лежали на широтах $25,63$ и $25,46^\circ$ соответственно. Расстояние между этими Д-волнами составляет $0,17^\circ$ и естественно было их объединить в одну Д-волну, лежащую в 1900 г. на широте $(25,63 + 25,46^\circ)/2 = 25,55^\circ$. Эта простая ситуация осложнялась тем, что рядом имелась еще одна Д-волна, определяемая землетрясением 11.II.1922 г. ($\varphi = -28,5^\circ$, $\lambda = -70,0^\circ$, $M_s = 8,4$). Эта волна в 1900 г. лежала на широте $25,08^\circ$, т.е. на расстоянии $0,47^\circ$ от определенной ранее Д-волны. При таком расстоянии (меньшем $0,5^\circ$) необходимо было объединить эти Д-волны, однако неясным оставался вопрос о том, как определить широту новой Д-волны, которая оказывалась объединением трех Д-волн от трех сильных землетрясений. Можно было действовать формально и взять среднее из всех трех широт, но обращал на себя внимание тот факт, что две из них близки (между ними $0,17^\circ$), а третья лежит втрое дальше — на расстоянии $0,47^\circ$. Кроме того, третья Д-волна определялась по старому землетрясению 1922 г., а две другие — по более поздним (1946 и 1969 гг.) и, следовательно, точность определения их эпицентров выше. Наконец, землетрясение 1922 г. лежит ближе всего к экватору, а это также служит указанием на относительно низкую точность определения координат эпицентра. В результате было принято решение вообще не учитывать землетрясение 1922 г., полагая, что его эпицентр определен с большой ошибкой.

Во второй версии системы Д-волн расстояние в $0,47^\circ$ оказалось слишком большим для того, чтобы считать землетрясение 1922 г. порожденным соседней Д-волной, поэтому была введена новая Д-волна, определяемая этим землетрясением; в 1900 г. она располагалась на широте $25,08^\circ$.

В первой версии имелась Д-волна, лежавшая в 1900 г. на широте $31,91^\circ$. Она определялась как среднее из трех Д-волн

Погрешность предсказания времени землетрясений
в новой и старой версиях системы Д-волн

Номер региона	T_i	Старая версия		Новая версия	
		θ_j	d	θ_j	d
9	1978,17	1978,24	0,07	1978,17	0
15	1978,17	—	—	1978,33	0,16
16	1978,42	1978,0	0,42	—	—
8	1978,83	1978,5	0,33	1978,9	0,07
10	1980,83	1980,5	0,33	1980,5	0,33
3	1981,0	1980,8	0,20	1980,83	0,17
17	1981,0	1980,5	0,50	1980,8	0,20
6	1983,33	1983,7	0,37	1983,47	0,14

(31,75; 32,0 и 32,01°) от трех землетрясений. Во второй версии эти три землетрясения определили две Д-волны на широтах 32,00 и 31,75°. Оказалось, что последняя из Д-волн приходит в Д-центр региона 9 ($\varphi_D = 43,15^\circ$) в момент $T = T_0 + (43,15 - 31,75)/0,15 = 1978,33$, где $T_0 = 1900$. В результате оказалось предсказанным землетрясение 24.III.1978 г. — единственное из восьми землетрясений 1978—1983 гг., которое не было предсказано прогнозом 1977 г., основанным на первой версии системы Д-волн. Вместе с тем новая версия системы Д-волн не предсказывает землетрясения 12.VI.1978 г., которое ранее предсказывалось. Это произошло вследствие того, что Д-волна, которая лежала в 1900 г. на широте 50,35°, после уточнения сдвинулась на широту 50,32°. Соответственно момент прихода этой Д-волны в Д-центр региона 16 стал равен $T = 1977,8$ и землетрясение отстоит от этого момента более чем на 0,5 года.

Таким образом, общее число землетрясений, предсказываемых новой системой Д-волн, осталось прежним (семь из восьми). Однако существенно уменьшилась разница d между моментом прихода Д-волны в Д-центр θ_j и моментом землетрясения T_i (табл. 35). Для первой версии системы Д-волн среднее значение d для семи предсказанных землетрясений равно 0,32 года, а для второй версии — 0,15 года. Максимальное d стало равным 0,33 года, что позволяет сократить время тревог на $1/3$. Это с лихвой компенсирует увеличение числа тревог за счет увеличения числа Д-волн в новой версии системы Д-волн.

§ 4. НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Во всех частях книги мы анализировали самые различные данные. В первой части это были хоть и разнородные, но вполне обычные геологические и геофизические данные, результаты измерений и наблюдений. Во второй части мы анализировали

априорные данные, старались осознать и выразить в явной форме наши знания об объектах, их структуре и отношениях. В третьей части мы перешли к анализу наших способов восприятия и описания объектов внешнего мира или их символического представления в виде графиков, разрезов, карт. Четвертая часть была посвящена анализу построения теории. Таким образом, мы поднимались по ступеням, анализируя все более и более абстрактные данные. Осталось сделать последний шаг — проанализировать саму книгу о неформальном анализе данных.

В каждой части книги господствует свой принцип анализа данных. Однако фактически постоянно наблюдается сочетание различных принципов. Принцип обучения на примерах (часть первая) сочетается с принципом использования априорной информации (часть вторая) в программе разделения нефтеносных и водоносных пластов. Принцип использования априорной информации сочетается с принципом системности (часть третья). Принцип системности требует интерпретации данного объекта в зависимости от интерпретации других объектов. Зависимость эта устанавливается с помощью критериев разумности. Критерии разумности и являются способом фиксации априорной информации. Например, разумной нужно признать корреляцию, при которой сохраняется неизменной последовательность пластов в сопоставляемых скважинах. Все три принципа используются в задаче расчленения многопластовой залежи.

Можно отметить не только согласованную работу различных принципов, но и взаимодействие принципов с противоречивыми тенденциями. Примером могут служить принципы абстрагирования и конкретизации. Для получения общей модели необходимы достаточно абстрактные построения, а для оправдания абстрактных теорий необходим анализ конкретных данных. Кстати, геологическая наука слабо использует эти два принципа: теоретические построения в геологии недостаточно абстрактны, они не выходят за пределы обыденного знания, а построенные «правдоподобные» теории не проходят достаточно жесткой проверки первичными данными.

Другой пример — принцип обучения и принцип адекватного языка описания. Принцип обучения реализуется в программах, которые используют «универсальный» язык для всех задач (например, язык достаточных конъюнкций в программе «Кора-3»). Принцип адекватного языка требует создания своего языка в каждой задаче. Особенность адекватного языка в том, что описание объекта на этом языке и есть название класса, к которому он принадлежит. Тем самым отвергается необходимость в обучении на примерах.

Наконец, сам предмет книги — неформальный анализ данных — находится в противоречии с используемым методом — построением алгоритмов решения задач. Ведь предмет наших исследований — это та часть процесса решения геологических

и геофизических задач, которая не задается формальными правилами. При этом выше всего оценивается такой анализ этой деятельности, который завершается созданием эффективного алгоритма. В результате неформальная деятельность исчезает. Ситуация напоминает древний символ — змею, пожирающую самое себя.

Необходимо сказать несколько слов о некоторых руководящих принципах (по философской терминологии — регулятивах) выбора, постановки и решения задач, которые в книге не были явно сформулированы. Этими принципами являются практичность, сложность, беспереборность и адекватный язык.

Практичность означает, что окончательная цель работы должна быть сформулирована как практическая задача с ясными критериями. Постановка задачи как исследовательской, как правило, плохо стимулирует разработку принципиально новых подходов и методов. Например, сформулировав задачу как «использование анализа Фурье для обработки снимков из космоса», можно получить целый ряд результатов: улучшение качества изображения, устранение высокочастотных деталей, выявление периодических структур и т. д. Если же поставить задачу «морфоструктурное районирование по снимкам из космоса», то очень скоро станет ясно, что анализ Фурье здесь бесполезен и необходимо искать принципиально новые пути.

Сложность означает, что нельзя слишком упрощать задачу. Более того, иногда легче решить большую и сложную задачу, чем отдельные подзадачи, из которых она состоит (например, легче разделить месторождение на отдельные залежи и выделить в каждой водонефтяной контакт, чем определять водонефтяной контакт независимо в каждой залежи). При решении сложной задачи мы вынуждены отказываться от решений *ad hoc* (на данный случай), от «протезов», которые, может быть, и срабатывают в некоторых частных случаях, однако оказываются беспомощными при малейшем изменении ситуации.

Беспереборность требует исключения метода полного (или даже неполного, но большого) перебора из арсенала методов решения задач. Описанный в гл. VII метод нелокального выделения объектов родился как антитеза методу проверки статистической различимости всех возможных разбиений пространства.

Выбор адекватного языка описания объектов и ситуаций пронизывает все задачи и все этапы решения задач.

В 1969 г. появилась работа [4], в которой, в частности, было выдвинуто положение о том, что решающим для задач распознавания является выбор адекватного языка описания объектов. Авторы не смогли тогда определить, что такое адекватный язык. Скорее они отталкивались от того, что ясно видели примеры неадекватного языка (описание изображения в виде последовательности нулей и единиц, описание каротажной диаграммы в виде n -мерного вектора или набора коэффи-

циентов разложения в ряд Фурье). В настоящее время можно уточнить понятие «адекватный язык».

Во-первых, адекватный язык должен быть конструктивным, т. е. должен существовать алгоритм, по которому можно получить описание объекта на этом языке.

Во-вторых, термины выбранного языка должны быть максимально независимыми друг от друга, т. е. контекстно независимыми. Эту особенность адекватного языка важно оттенить на фоне системного подхода. Системный подход требует, чтобы фрагменты целого интерпретировались в зависимости от всего остального. Интерпретация подразумевает отнесение данного фрагмента к какому-либо классу («нога», «нос», «дом», «пласт» и т. п.). А классы как раз и должны соответствовать независимым понятиям. Итак, отнесение данного фрагмента к независимому классу производится в зависимости от интерпретации остальных фрагментов. По критерию независимости от контекста языки можно упорядочить следующим образом. На одном краю стоит поэтический язык — в нем интерпретация каждого слова максимально зависит от остальных слов, от контекста. Далее стоит язык литературной прозы, затем следует язык научной литературы, который стремится быть максимально контекстно независимым, но далеко не всегда достигает этого. Наконец, на краю стоит язык вычислительных машин — идеально контекстно свободный, но чрезвычайно бедный.

В-третьих, описание объекта на адекватном языке должно являться названием класса. Это — идеальный случай, и в геологии пока нельзя привести примера языка, обладающего таким свойством. Тем не менее примеры таких языков имеются [18].

Очень часто геологию называют описательной наукой и определяют на основании этого как науку, находящуюся на раннем этапе развития. Действительно, описательная деятельность составляет важнейшую часть геологической работы. Однако должно быть ясно, что проблема описания (выбор языка, выделение объектов, установление уровней иерархии и т. п.) является исключительно важной общенаучной проблемой и не имеет аналогов в физике и математике. Поэтому наличие «описательного» компонента не ставит геологию на более низкую ступень по сравнению с другими науками, а ставит ее на другую лестницу, определяет ее особое лицо, ее особый вклад в науку о природе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В последние годы много внимания уделяется методологическим проблемам различных наук, в том числе и геологии. Методологический анализ геологии во многом сосредоточен на проблемах математизации. В свою очередь, проблема математизации геологии выдвинула в качестве основного вопрос о формализации постановок задач, методов их решения, формализации основных понятий и способов доказательств. На эту тему имеется много работ, написанных математиками, методологами, геофизиками и геологами. Критика в адрес геологии, прозвучавшая в этих работах, во многом справедлива, однако она не исчерпывает проблемы.

Слишком часто в дискуссиях на темы математизации и формализации явно или неявно звучат следующие два тезиса: 1) геология находится на более низкой ступени развития, чем математика; 2) известных математических методов достаточно, чтобы разрешить имеющиеся геологические трудности. Коснемся вначале первого тезиса. Так же, как нельзя упорядочивать народы по степени их развития, нельзя по этому критерию упорядочивать различные науки. Каждую науку нужно ценить за ее неповторимый вклад в научную картину мира, в человеческую культуру.

Величайший вклад геологии в человеческую культуру — введение понятия геологического времени, процессов, развивающихся во времени, эволюции Земли. Это взорвало религиозные догматы о сотворении мира и послужило одной из причин упадка церкви и торжества просвещения. Это привело к созданию эволюционной теории Дарвина. Генетическая концепция — крупнейшее завоевание геологии. Поэтому понятна (но далеко не всегда обоснована) такая приверженность к ней геологической науки.

Нельзя сравнивать геологию с математикой еще и потому, что они изучают существенно разные предметы. Математика сама себе конструирует предмет исследования. В результате она судит только о том, о чем может судить. В геологии предмет исследования в большой мере задан извне. Он не схож с объектами физики, химии или других наук. Отличен также способ получения данных об объекте исследования; в геологии это в основном наблюдение (или в натуре, или на картах, схемах и графиках). Эти особенности геологии ставят под сомнение второй из упомянутых тезисов: о достаточности существующих математических методов.

В книге показано, что существует класс геологических задач (выделение объектов, расчленение разрезов и др.),

которые требуют целостного (системного) подхода. Эта особенность геологических задач связана с особенностью получения и обработки большинства геологических данных — через зрительное восприятие, т. е. с участием человека. Вот эта необходимость построения теорий обработки данных, учитывающих особенности человеческого восприятия, потребовала разработки новых методов, реализующих идею целостности. Естественно, что это не единственная проблема, которая требует своей постановки и разрешения в области анализа данных в геологии и геофизике.

Реализация целостного подхода в задаче выделения геологических объектов позволила сформулировать некоторые общие принципы, имеющие теоретическое и прикладное значение во многих других областях науки, например в теории систем, кластерном анализе, психологии восприятия.

Именно в геологии и геофизике утверждали себя методы распознавания образов. Анализ объектов в многомерном пространстве оказался тупиковым направлением в той области, где он родился, — в области распознавания изображений. Однако эффективное решение этим методом геологических и геофизических задач дало новую жизнь этому методу. Он был вскоре подхвачен в медицине, социологии, психологии и ряде других наук как эффективный метод комплексного анализа разнородных (количественных и качественных) данных. Таким образом, в настоящее время, как это неоднократно было и в прошлом, геология выступает не только как потребитель идей и результатов других наук (химии, физики, математики), но и как источник новых идей, имеющих общенаучную и общекультурную значимость.

В настоящее время общее мнение склоняется к тому, что в содружестве наук на первое место выдвигается биология. Причина этого не только в том, что развитие биологии сулит нам сохранение и умножение богатств органического мира. Важность биологии в том, что она вовлекает в сферу научного исследования объекты (клетки, особи, популяции, биоценозы), которые не поддаются адекватному изучению существующими методами, и тем самым открывает новые пути развития науки. С методологической точки зрения геология играет аналогичную роль. С одной стороны, ее достижения обеспечивают человечество богатствами неорганического мира (без которых человечество не может обойтись так же, как и без продуктов органического мира). С другой стороны, геология исследует объекты (породы, месторождения, разломы, плиты), которые не поддаются адекватному изучению известными методами, и тем открывает дорогу развитию новых научных методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Берталанфи Л. фон.* История и статус общей теории систем.— В кн.: Системные исследования: Ежегодник, 1973, М., Наука, с. 20—37.
2. *Бонгард М. М.* Проблема узнавания.— М.: Наука, 1967.
3. *Браверман Э. М.* Опыты по обучению машины распознаванию зрительных образов.— Автоматика и телемеханика, 1962, т. XXIII, № 3, с. 13—21.
4. *Взаимодействие в биологических системах/Ю. М. Васильев, И. М. Гельфонд, Ш. А. Губерман, М. Л. Шик.*— Природа, 1969, № 6, с. 13—21, № 7, с. 24—33.
5. *Вилькович Е. В., Губерман Ш. А., Кейлис-Борок В. И.* Волны тектонических напряжений на крупных разломах.— Докл. АН СССР, т. 219, № 1, 1974, с. 77—80.
6. *Вопросы кибернетики. Задачи медицинской диагностики и прогнозирования с точки зрения математики.* Под ред. И. М. Гельфонда. М., 1985.
7. *Воронин Ю. А.* Введение в теорию классификаций.— Новосибирск.: изд. ВЦ СО АН СССР, 1982.
8. *Ворокин Ю. А.* Методологические вопросы применения математических методов и ЭВМ в геологии.— Новосибирск—Якутск.: изд. ВЦ СО АН СССР, 1973.
9. *Гельфонд И. М., Цетлин М. Л.* Метод «оврагов».— Успехи матем. наук, т. 17, 1962, с. 103—121.
10. *Геология гигантских месторождений нефти и газа.* Ред. М. Хэлбути. Пер. с англ.— М.: Мир, 1973.
11. *Геология и математика.*— Новосибирск.: Наука, 1967.
12. *Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений/М. А. Фаворская, И. Н. Томсон, В. А. Баскина и др.*— М.: Недра, 1974.
13. *Губерман Ш. А.* Д-волны и землетрясения.— В кн.: Теория и анализ сейсмологических наблюдений. Вычислительная сейсмология, вып. 12.— М.: Наука, 1979, с. 158—188.
14. *Губерман Ш. А.* Комплексная интерпретация геофизических данных с помощью обучающейся программы.— В кн.: Проблемы ядерной геофизики.— М.: Недра, 1964, с. 51—57.
15. *Губерман Ш. А., Розенцвейг В. В.* Алгоритм распознавания рукописных текстов.— Автоматика и телемеханика, 1976, № 5, с. 122—129.
16. *Долгосрочный прогноз и прогноз Камчатских землетрясений/С. А. Федотов, Г. А. Соболев, С. А. Болдырев и др.*— В кн.: Поиски предвестников землетрясений.— Ташкент.: ФАН, 1976, с. 17—31.
17. *Доронин Б. М., Воронин Ю. А.* О методике и результатах использования эпидемиологических признаков при диагностике сосудистых заболеваний головного мозга.— В кн.: Сосудистые, инфекционные и наследственные заболевания нервной системы.— Новосибирск.: Изд. Новосибирского медицинского ин-та, 1974, с. 88—95.
18. *Жидков М. П., Ротвайн И. М., Садовский А. М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. IV. Высокосейсмичные пересечения линейментов Армянского нагорья, Балкан и бассейна Эгейского моря.— В кн.: Интерпретация данных сейсмологии и неотектоники. Вычислительная сейсмология, вып. 8.— М.: Наука, 1975, с. 53—70.
19. *Жуков Р. А., Гурза В. В., Ткачев Ю. Р.* Проблема выделения объектов исследования в геологии.— Труды ВСЕГЕИ. Новая серия, т. 223, 1975, с. 14—27.
20. *Забродин В. Ю.* Познавательная ситуация в современной геологии.— Вопросы философии, 1985, № 1, с. 64—71.

21. *Комплексная интерпретация геологических и геофизических данных на вычислительных машинах.*—Труды МИНХ и ГП им. Губкина, вып. 62.—М.: Недра, 1966.
22. *Корреляция геофизических разрезов скважин на ЭВМ/Ш. А. Губерман, Е. Е. Калинина, М. И. Овчинникова, В. Ф. Осипов.*—Геология нефти и газа, 1981, № 2, с. 52—58.
23. *Косыгин Ю. А. Тектоника.*—М.: Недра, 1983.
24. *Найссер У. Познание и реальность. Пер. с англ.*—М.: Прогресс, 1981.
25. *Нестеров И. И., Потеряева В. В., Салманов Ф. К. Закономерности распределения крупных месторождений нефти и газа в земной коре.*—М.: Недра, 1975.
26. *Овчинников Н. Ф. Структура и симметрия.*—В кн.: Системные исследования. Ежегодник.—М.: Наука, 1969, с. 111—121.
27. *Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения.*—М.: Наука, 1975.
28. *Ранцман Е. Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран.*—М.: Наука, 1979.
29. *Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань/И. М. Гельфанд, Ш. А. Губерман, М. Л. Извекова и др.*—В кн.: Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. Вычислительная сейсмология, вып. 6.—М.: Наука, 1973, с. 107—133.
30. *Рудоконцентрирующие структуры Азии и их металлогения/М. А. Фаворская, В. А. Баскина, Н. Л. Шилин и др.*—М.: Недра, 1983.
31. *Садовский В. Н. Основания общей теории систем.*—М.: Наука, 1974.
32. *Салин Ю. С. Стратиграфическая корреляция.*—М.: Недра, 1983.
33. *Смирнов Б. И. Системно-структурные исследования в геологии.*—Геология и геохимия горючих ископаемых. Республиканский межведомственный сборник, вып. 51.—Киев.: Наукова думка, 1978, с. 81—87.
34. *Справочник по нефтяным и газовым месторождениям зарубежных стран.* Под ред. И. В. Высоцкого.—М.: Недра, 1976.
35. *Условия возникновения сильных землетрясений/И. М. Гельфанд, Ш. А. Губерман, В. И. Кейлис-Борок и др.*—В кн.: Исследования сейсмичности и модели Земли. Вычислительная сейсмология, вып. 9.—М.: Наука, 1976, с. 3—91.
36. *Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Пер. с англ.*—М.: Мир, 1964, с. 498.
37. *Хрестоматия по истории психологии.* Под ред. П. Я. Гальперина, А. Н. Ждан.—М.: Изд-во МГУ, 1980.
38. *Черский Н. В., Царев В. П. Причина приуроченности крупных зон нефтегазоаккумуляции к краевым участкам литосферных плит.*—Докл. АН СССР, 1978, т. 242, № 3, с. 683—685.
39. *Шрейдер Ю. А., Шаров А. А. Системы и модели.*—М.: Радио и связь, 1982.
40. *Anderson D. L. Earthquakes and the rotation of the Earth.*—Science, 1974, vol. 186, No. 4158, p. 48—50.
41. *Duda S. J. Secular seismic energy release in circumpacific belt.*—Tectonophysics, vol. 2(5), 1965, p. 409—452.
42. *Gelfand I. M. et al. Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California.*—Physics of the Earth and Planetary Interior, vol. 11, 1976, p. 227—283.
43. *Gold T. Terrestrial sources of Carbon and earthquake outgassing.*—J. of Petroleum Geology, 1979, vol. 1, No. 3, p. 3—13.
44. *Haites T. B. Perspective correlation.*—Bull. Amer. Assoc. of Petrol. Geol., 1963, vol. 47, No. 4, p. 553—574.
45. *Jekhowsky B. de. La methode des distances minimales, nouveau procede quantitatif de correlation stratigraphique; exemple d'application on paliontologie.* Rev. Inst. Franc. du Petrole, Paris, 1963, vol. XVIII, No. 5, p. 629—653.
46. *Kanatomy H. Energy release in great earthquakes.*—J. Geophys. Res., 1977, vol. 82, No. 20, p. 2981—2993.

47. Mogi K. Migration of seismic activity.—Bull. Earthquake Res. Inst., Univ. Tokyo, 1968, vol. 46, p. 53—63.

48. Rosenblatt F. The Perceptron: a probabilistic model for information storage and organization storage and organization in brain.—Psychol. Rev., 1958, vol. 65, p. 386—408.

49. Stoyco A. La variation séculaire de la rotation de la terre at les problèmes connéxes.—Ann. Guebhard, 46 année, 1970, vol. 293, p. 316.

50. Kanamori H., Abe K. Reevaluation of the turn-of-the century seismicity peak.—J. Geophys. Res., 1979, No. 11, p. 6131—6139.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Вступительная статья	3
Предисловие	5
Часть первая. НЕФОРМАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ	10
Глава I. АЛГОРИТМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ И РЕШЕНИЕ ГЕОЛО- ГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	10
§ 1. Персептрон	12
§ 2. Геометрическая интерпретация	14
§ 3. Геологические задачи распознавания образов	16
§ 4. Проблема метрики в геологических задачах	20
§ 5. Статистический подход	22
§ 6. Метод «оврагов» в задачах распознавания	25
§ 7. Алгоритм «Кора-3»	28
Глава II. НЕФОРМАЛЬНЫЕ ЭТАПЫ РАБОТ В ЗАДАЧАХ РАСПО- ЗНАВАНИЯ НЕФТЕНОСНЫХ ПЛАСТОВ	33
§ 1. Задача разделения нефтеносных и водоносных песчаников по данным каротажа	34
§ 2. Выделение нефтеносных пластов в карбонатных коллекторах	50
Глава III. ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗНОЙ КАРТЫ	54
§ 1. Выбор объекта и постановка задачи	54
§ 2. Надежность распознавания	62
§ 3. Смена объекта распознавания	64
Глава IV. ДОКАЗАТЕЛЬНОСТЬ И ПРАВДОПОДОБИЕ	71
§ 1. Геологические и математические критерии доказательности	71
§ 2. Обоснование решающего правила	76
Часть вторая. АНАЛИЗ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АПРИОРНОЙ ИН- ФОРМАЦИИ	82
Глава V. АПРИОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ В ЗАДАЧАХ РАСПОЗНА- ВАНИЯ ОБРАЗОВ	86
§ 1. Использование принципа упорядоченности	86
§ 2. Использование предыдущего опыта в задачах распознавания	94
§ 3. Индивидуальный подход	103
Глава VI. КОРРЕЛЯЦИЯ РАЗРЕЗОВ СКВАЖИН	107
§ 1. Неформальные основания литологической корреляции	110
§ 2. Идентификация пластов	115
§ 3. Гипотеза Хейтса или закон Хейтса?	124
§ 4. Пример корреляции разрезов на ЭВМ	134
Часть третья. АНАЛИЗ ДАННЫХ И ЦЕЛОСТНЫЙ ПОДХОД	143
Глава VII. ВЫДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ (СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД)	143
§ 1. Общие основания процедуры выделения объектов	143
§ 2. Алгоритм нелокального выделения объектов	149
§ 3. Кластерный анализ	156
§ 4. Алгоритмические аспекты системного подхода	159
§ 5. Системный подход и геологические задачи	165
Глава VIII. РЕШЕНИЕ НЕЛОКАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ	169

Часть четвертая. МОДЕЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ УПРАВЛЕНИЯ АНАЛИЗОМ ДАННЫХ	179
Глава IX. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ	179
§ 1. Информативность методов каротажа и модель пласта	179
§ 2. Модель сейсмогенного дизъюнктивного узла	186
§ 3. Волны тектонических деформаций на крупных разломах	192
Глава X. МОДЕЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА ДАННЫХ	198
§ 1. Возникновение гипотезы Д-волн	198
§ 2. Сейсмические следствия гипотезы Д-волн	224
§ 3. Связь месторождений полезных ископаемых с Д-широтами	228
Глава XI. ПРОВЕРКА ПРОГНОЗОВ	238
§ 1. Прогнозная карта рудного месторождения	239
§ 2. Результаты прогноза мест сильных землетрясений	242
§ 3. Прогноз землетрясений по Д-волнам	244
§ 4. Некоторые принципы анализа данных	251
Заключение	255
Список литературы	257

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Шеля Айзикович Губерман

**НЕФОРМАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ
В ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКЕ**

Редактор издательства *Т. И. Борушко*
Переплет художника *А. Н. Курьерова*
Художественный редактор *В. В. Шутько*
Технический редактор *Е. Л. Закашанская*
Корректор *И. П. Розанова*

ИБ № 6538

Сдано в набор 17.09.86. Подписано в печать 26.01.87. Т-07616. Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 2. Гарнитура Литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 16,5. Усл. кр.-отт. 16,5. Уч.-изд. л. 17,98. Тираж 2700 экз. Заказ 674/698-3. Цена 3 руб.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра»,
125047, Москва, пл. Белорусского вокзала, 3.

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 190000, Ленинград, Прачечный переулок, 6.